



A cooperação homem-robot em sistemas de produção flexíveis e reconfiguráveis: contribuições para uma metodologia de desenho de linhas de produção

Flávia Xavier Moreira Daemon

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Jorge Pinho de Sousa

Co-orientador: Samuel Moniz

25 de Junho de 2017

Resumo

Os sistemas de montagem desempenham um papel crítico na qualidade do produto, na produtividade do sistema e no custo da produção. A presente dissertação visa analisar a influência de uma característica que, atualmente, e cada vez mais, se mostra essencial em sistemas deste tipo: a flexibilidade.

Recorrer à automação é uma estratégia frequentemente utilizada para promover o aumento da produtividade e eficiência deste tipo de sistemas. No entanto, apesar do tremendo desenvolvimento verificado nesta área, ainda não há evidências de que o trabalho manual tenha sido ultrapassado enquanto recurso totalmente flexível. Esta é uma das maiores dificuldades no desenvolvimento de sistemas de montagem reconfiguráveis. Cada vez mais, a competitividade dos sistemas de produção encontra-se intimamente relacionada com requisitos de flexibilidade e, frequentemente, depende da sua capacidade de reconfiguração. Neste sentido, a alocação de tarefas entre humanos e máquinas é uma etapa essencial e especialmente crítica. A fim de utilizar plenamente as capacidades de homens e, ao mesmo tempo, beneficiar das vantagens proporcionadas pelos desenvolvimentos tecnológicos da automação, a interação entre estes precisa ser estudada, estruturada e bem concebida. Uma solução comum passa por integrar operações manuais e automatizadas em sistemas de produção semi-automáticos que promovam a cooperação entre recursos.

A presente dissertação assenta no desenvolvimento teórico e na aplicação prática do conceito de cooperação entre homens e robôs em sistemas de montagem reconfiguráveis. O objetivo é ultrapassar a falta de atenção prestada à correta alocação destes recursos, através da apresentação de uma metodologia baseada nos princípios de cooperação. Uma ferramenta apropriada é desenvolvida para proporcionar um planeamento eficiente da alocação de tarefas entre recursos, segundo diferentes níveis de automação, de forma a otimizar a performance de ambos em cada uma das operações e os princípios de reconfigurabilidade do sistema.

A metodologia foi avaliada através da sua aplicação num caso de estudo real e com a utilização de técnicas de simulação baseadas em eventos discretos. Os resultados alcançados evidenciam os benefícios da aplicação da metodologia, sendo estes traduzidos em termos de redução de *lead time*, de aumento da capacidade de produção e da taxa de utilização de recursos bem como, de diminuição das necessidades de reconfiguração do sistema.

Abstract

The assembly systems plays a critical role in product quality, system productivity and production cost. The following dissertation aims to analyze the influence of a characteristic that currently, and increasingly, presents itself as essential in systems of this type: flexibility.

Resorting to automation is a strategy frequently used to increase the productivity and efficiency of these type of systems. However, despite the tremendous development achieved in this area, there is still no evidence that manual work has been overcome as a fully flexible resource. This is one of the biggest difficulties in developing reconfigurable assembly systems. More and more, the competitiveness of the production systems finds itself intimately related with flexibility requirements, and frequently depends on its capability of reconfiguration. In this sense, the assignment of tasks between humans and machines is an essential and especially critical step. In order to make full use of men's competences and still preserve benefits from the advantages of technological developments in automation, interaction between them must be studied, structured and well-designed.

The following dissertation is based on the theoretical development and the practical application of the concept of companies interaction between men and robots in reconfigurable assembly systems. The key objective is to overcome the lack of attention given to the correct allocation of resources, through the presentation of a direct methodology in the principles of cooperation. An application adapted to an efficient planning of the maintenance of tasks between resources, according to levels of automation, to optimize the performance of both in each one of the operations and principles of reconfigurability of the system.

The methodology was evaluated through its application in a real case study and simulation techniques in case of discrete events. The results show the benefits of applying the methodology, which are translated in terms of lead time reduction, increase in production capacity and resource utilization rate, as well in the reduction of system reconfiguration needs.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, porque eu acredito, de verdade, que sem Ele nada era possível.

Agradeço de seguida a minha família, a minha tia e madrinha Lucinha por todo o apoio, por reconhecer quando precisei de conselhos e por me dar os mais acertados; Ao meu pai, que mesmo longe não deixou de oferecer suporte e força; A minha irmã, por ser a melhor pessoa que alguém pode ser, por toda a ajuda e carinho, por essa amizade que é sem dúvida a maior que eu tenho; a minha avó Dulce, a quem eu tenho tanto orgulho de orgulhar, por me ter dado a oportunidade de estar aqui hoje, por olhar por mim, mesmo que seja um olhar um bocadinho mais distante; Ao meu tio Fernando, que sei que também me olha e me protege; Mas, principalmente, a minha mãe, por tudo o que fez e faz por mim, por ter dado tudo de si para que hoje eu pudesse saber que vivi ao máximo os melhores 5 anos da minha vida.

Aos meus orientadores, pela disponibilidade e paciência, pelos ensinamentos e, principalmente, pela motivação. A todos os professores que me acompanharam, por toda a experiência, conhecimentos, sabedoria e ética com que me presentearam, e que levarei comigo para a minha vida pessoal e profissional.

Ao Luís, que me deu uma ajuda especial na realização desta tese, e que foi realmente fundamental.

Aos grandes amigos que fiz aqui, por todo o apoio, companheirismo, momentos incríveis e outras coisas épicas. Por terem vivido comigo os melhores 5 anos da minha vida.

E, por fim, a todos aqueles que de algum modo fizeram parte da minha vida no decorrer destes 5 anos. Aos que entretanto acabaram por ir embora mas, principalmente, aos que vão ficar pra sempre.

Flávia Daemon

“Mudanças apenas podem ser tratadas com mudanças.”

Zhuming Bi

Conteúdo

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introdução | 1 |
| 1.1 | Contexto | 2 |
| 1.1.1 | Evolução dos Paradigmas de sistemas de Produção | 2 |
| 1.1.1.1 | Desvantagens dos Paradigmas Convencionais | 3 |
| 1.1.1.2 | Necessidade de Sistemas Reconfiguráveis | 4 |
| 1.1.2 | Sistemas Reconfiguráveis - Reconfigurable Manufacturing Systems (RMS) | 5 |
| 1.1.2.1 | Conceito | 5 |
| 1.1.2.2 | Características | 6 |
| 1.1.3 | <i>Drivers</i> dos sistemas RAS | 7 |
| 1.2 | Motivação | 8 |
| 1.3 | Objetivos | 9 |
| 1.4 | Metodologia | 9 |
| 1.5 | Estrutura da Dissertação | 10 |
| 2 | Revisão Bibliográfica | 11 |
| 2.1 | Sistemas de Produção | 12 |
| 2.1.1 | Sistemas de Montagem - <i>Assembly Systems</i> | 12 |
| 2.2 | Design e Configuração | 15 |
| 2.2.1 | Aplicação do conceito de flexibilidade em sistemas de montagem | 16 |
| 2.2.2 | Aplicação do conceito de Reconfigurabilidade | 18 |
| 2.3 | Automação em Sistemas de Produção | 19 |
| 2.3.1 | Níveis de Automação - Level of Automation (LoA) | 20 |
| 2.3.2 | Alocação de Tarefas | 22 |
| 2.3.2.1 | Estratégias para alocação de tarefas | 23 |
| 2.3.3 | Automação Adaptativa | 24 |
| 2.4 | Homem e Máquina em Sistemas de Montagem | 25 |
| 2.4.1 | Cooperação Homem-Máquina | 26 |
| 2.4.1.1 | Tipos de Cooperação | 27 |
| 2.4.2 | Tecnologias de Automação em sistemas Cooperativos | 28 |
| 2.4.2.1 | Robôs Cooperativos | 30 |
| 2.4.3 | Avaliação da performance | 32 |
| 2.4.3.1 | Revisão das técnicas de medição | 32 |
| 2.5 | Conclusões | 33 |
| 3 | Abordagem Proposta | 35 |
| 3.1 | Introdução | 35 |
| 3.2 | Descrição do Problema | 35 |
| 3.3 | Metodologia Proposta | 36 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 3.3.1 | Passo 1: Análise do produto | 37 |
| 3.3.2 | Passo 2: Análise dos processos | 38 |
| 3.3.3 | Passo 3: Definição dos níveis de automação do sistema | 41 |
| 3.3.3.1 | Alocação de tarefas | 41 |
| 3.3.3.1.1 | | 43 |
| 3.3.3.2 | Decisão do nível de Automação | 52 |
| 4 | Aplicação ao caso de estudo | 59 |
| 4.1 | Descrição do caso de estudo | 59 |
| 4.1.1 | Requisitos funcionais | 60 |
| 4.1.2 | Proposta atual | 60 |
| 4.1.3 | Oportunidades | 62 |
| 4.2 | Aplicação da abordagem ao caso de estudo | 62 |
| 4.2.1 | Aplicação do Passo 1 | 63 |
| 4.2.2 | Aplicação do Passo 2 | 64 |
| 4.2.3 | Aplicação do Passo 3 | 65 |
| 4.2.3.1 | Descrição detalhada da abordagem adotada | 65 |
| 4.2.3.2 | Procedimento | 66 |
| 4.3 | Conclusões | 80 |
| 5 | Simulação e Análise de resultados | 83 |
| 5.1 | Introdução | 83 |
| 5.2 | Simulação | 83 |
| 5.2.1 | Requisitos de performance | 84 |
| 5.2.2 | Correlação com a metodologia proposta | 86 |
| 5.2.2.1 | Definição dos parâmetros de penalização | 86 |
| 5.2.2.2 | Definição dos fatores multiplicativos | 87 |
| 5.2.3 | Aplicação ao caso de estudo | 88 |
| 5.2.4 | Modelo de simulação desenvolvido | 89 |
| 5.2.4.1 | Objetos | 90 |
| 5.2.4.2 | Estrutura de dados | 91 |
| 5.2.4.3 | Processos | 93 |
| 5.2.5 | Abordagens e Resultados | 93 |
| 5.2.5.1 | Abordagem 1 | 93 |
| 5.2.5.2 | Abordagem 2 | 97 |
| 5.2.5.3 | Resultados | 98 |
| 6 | Conclusão | 101 |
| 6.1 | Trabalho Futuro | 102 |
| A | Pesos dos Recursos | 103 |
| B | Matrizes AHP: Limites | 105 |
| C | Matrizes AHP: WS1 | 109 |
| D | Matrizes AHP: WS2 | 113 |
| E | Matrizes AHP: WS3 | 115 |

| | |
|---------------------------------|------------|
| F Matrizes AHP: WS8e9 | 119 |
| G Fatores de Penalização | 123 |
| Referências | 127 |

Lista de Figuras

| | | |
|------|---|----|
| 2.1 | Tipos de Sistema de Montagem (Adaptado de [1]) | 13 |
| 2.2 | Linhas de Montagem para uma e múltiplas variantes de produtos (Fonte: [1]) . . | 14 |
| 2.3 | Performance de sistemas de montagem segundo os diferentes princípios de montagem (Fonte: [2]) | 15 |
| 2.4 | Classificação de linhas de montagem | 17 |
| 2.5 | Relação Custo-Volume de produção para os diferentes tipos de sistemas de produção (Fonte: [3]) | 18 |
| 2.6 | Separação de funções automatizáveis em mecanização e informatização (Fonte: [4]) | 21 |
| 2.7 | Escala de Níveis de Automação no âmbito de sistemas de produção (Fonte: [5]) . | 22 |
| 2.8 | Lista MABA-MABA (Fitts 1985) (Fonte: [6]) | 23 |
| 2.9 | Exemplo de resultado da aplicação da metodologia DYNAMO (Fonte: [7]) | 25 |
| 2.10 | Diferentes tipos de Cooperação entre humanos e robôs (Fonte: [8]) | 28 |
| 3.1 | Esquema gráfico da abordagem metodológica | 36 |
| 3.2 | Diagrama hierárquico para representação de produtos | 37 |
| 3.3 | Requisitos essenciais das classes de operações | 39 |
| 3.4 | Representação do grafo de precedências sugerido pela metodologia | 40 |
| 3.5 | Estruturação da linha segundo a classe de operações | 40 |
| 3.6 | Configuração dos módulos da linha segundo os módulos do produto (Adaptado de [9]) | 41 |
| 3.7 | Esquematização do passo 3 da metodologia: Definição dos níveis de automação do sistema | 42 |
| 3.8 | Diagrama hierárquico do método AHP | 47 |
| 3.9 | Matriz de comparação par-a-par para as alternativas em relação à necessidade de força | 48 |
| 3.10 | Matriz AHP | 49 |
| 3.11 | Representação da matriz AHP (A1) normalizada | 49 |
| 3.12 | Representação dos pesos que cada um dos critérios comporta na realização da operação | 50 |
| 3.13 | Representação dos pesos transposta | 50 |
| 3.14 | Passo intermédio para o cálculo do índice de consistência | 50 |
| 3.15 | Representação dos resultados finais da análise AHP | 51 |
| 3.16 | Diagrama representativo do peso de cada um dos requisitos e dos agentes na realização da operação | 52 |
| 3.17 | Matriz de Decisões e representação dos limites entre níveis | 56 |
| 3.18 | Níveis de automação do sistema de montagem | 57 |
| 4.1 | Representação do chão de fábrica correspondente ao caso de estudo | 59 |

| | | |
|------|--|-----|
| 4.2 | Classificação inicial das operações de montagem | 61 |
| 4.3 | Representação esquemática da linha de montagem apresentada no caso de estudo | 61 |
| 4.4 | Diagrama ilustrativo dos produtos e componentes operados em cada estação de trabalho | 63 |
| 4.5 | Estruturação hierárquica da família de produtos | 63 |
| 4.6 | Caracterização dos produtos da linha de montagem | 64 |
| 4.7 | Grafo de precedências das operações do caso de estudo | 65 |
| 4.8 | Resultados: Separação da tampa da biela | 67 |
| 4.9 | Resultados: Pick & Place: Tampas da biela | 68 |
| 4.10 | Resultados: Introdução do pistão no bloco do cilindro | 69 |
| 4.11 | Resultados: Instalação do bloco de circulação de água | 69 |
| 4.12 | Resultados: Inspeção do pistão | 70 |
| 4.13 | Resultados: Inversão do bloco do motor | 71 |
| 4.14 | Resultados: Inserção de 2 pinos tipo "A" | 71 |
| 4.15 | Resultados: Inserção de 2 pinos tipo "B" | 72 |
| 4.16 | Resultados: Inserção de 2 pinos tipo "C" | 73 |
| 4.17 | Resultado da alocação de tarefas: Inserção de 2 pinos tipo "D" | 73 |
| 4.18 | Resultado da alocação de tarefas: Aspiração das tampas da biela | 74 |
| 4.19 | Resultados: Aspiração do bloco do motor | 75 |
| 4.20 | Resultados: Leitura do Código de barras da biela | 75 |
| 4.21 | Resultados: Inspeção do bloco do motor | 76 |
| 4.22 | Resultados: Pick & Place: Árvore de Cames | 77 |
| 4.23 | Resultados: Instalação da Árvore de Cames | 77 |
| 4.24 | Resultados: Instalação da Correia | 78 |
| 4.25 | Resultados: Aparafusamento de 8 parafusos da Árvore de Cames | 78 |
| 4.26 | Nível de Automação das tarefas da estação de trabalho | 79 |
| 4.27 | Nível de Automação das tarefas da estação de trabalho 2 | 79 |
| 4.28 | Nível de Automação das tarefas da estação de trabalho 3 | 79 |
| 4.29 | Nível de Automação das tarefas das estações de trabalho 8 e 9 | 80 |
| 5.1 | Associação entre análises para definição das penalizações | 87 |
| 5.2 | Fatores de penalização definidos | 89 |
| 5.3 | Tempos de operação antes e após penalização | 90 |
| 5.4 | Esquematização da estrutura de dados utilizada no modelo de simulação | 92 |
| 5.5 | Ilustração do cenário 1 utilizado no modelo de simulação | 94 |
| 5.6 | Ilustração do cenário 2 utilizado no modelo de simulação | 94 |
| 5.7 | Ilustração do cenário 3 utilizado no modelo de simulação | 95 |
| 5.8 | Ilustração do movimento dos robôs DiFLEX na linha de montagem | 98 |
| 5.9 | Resultados da simulação da abordagem 2: Número de Reconfigurações e <i>Lead-Time</i> médio | 98 |
| 5.10 | Cenário 4: Número de Robôs, <i>Lead-Time</i> médio e número de motores produzidos | 99 |
| 5.11 | Cenário 5: Número de Robôs, <i>Lead-Time</i> médio e número de motores produzidos | 99 |
| 5.12 | Cenário 6: Número de Robôs, <i>Lead-Time</i> médio e número de motores produzidos | 100 |
| A.1 | Pesos dos agentes em relação à satisfação dos critérios de comparação | 104 |

Lista de Tabelas

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Sumário de objetivos e limitações dos diferentes paradigmas de sistemas | 5 |
| 3.1 | Requisitos que limitam a performance dos humanos na realização de tarefas . . . | 44 |
| 3.2 | Requisitos que limitam a performance das máquinas na realização de tarefas . . . | 45 |
| 3.3 | Escala de prioridades utilizada na análise AHP | 47 |
| 3.4 | Índice aleatório IA | 51 |
| 3.5 | Proposta de classificação para níveis de Automação em operações de montagem . | 53 |
| 3.6 | Robôs Industriais tradicionais vs. Robôs Flexíveis | 53 |
| 5.1 | Comparação entre tempos de operação de humanos e robôs (Fonte: [10]) | 88 |
| 5.2 | Simulação da abordagem 1: Comparação do Lead Time médio | 95 |
| 5.3 | Simulação da abordagem 1: Comparação dos tempos de ciclo médios | 96 |
| 5.4 | Simulação da abordagem 1: Comparação do número de motores produzidos . . . | 96 |

Abreviaturas e Símbolos

| | |
|-----------|--|
| RAS | Reconfigurable Assembly System |
| DMS | Dedicated Manufacturing Systems |
| DML | Dedicated Manufacturing Lines |
| JIT | Just-In-Time |
| TQM | Total Quality Management |
| CMS | Cellular Manufacturing Systems |
| FMS | Flexible Manufacturing Systems |
| RMS | Reconfigurable Manufacturing Systems |
| AHP | Analytic Hierarchy Process |
| MABA-MABA | Men are better At - Machines are better at |
| IAD | Intelligent Assistant Device |
| RTM | Robot Time Motion |
| MTM | Method-Time Measurement |
| PMTS | Predetermined Motion Time System |
| DES | Discrete Event Simulation |
| FIFO | FIRST IN FIRST OUT |

Capítulo 1

Introdução

Nos sistemas de produção atuais, as mudanças tornaram-se uma constante [11]. O crescente aumento de variantes de produtos, impulsionado pelas preferências cada vez mais exigentes dos clientes e pelos frequentes avanços em inovações tecnológicas, aliado à flutuação recorrente nos volumes de produção, introduzem desafios que afetam diretamente o projeto de sistemas de produção [11]. Além disso, o ambiente produtivo atual é caracterizado por uma concorrência cada vez mais agressiva na escala global, tornando evidente a necessidade de alcançar elevados padrões de desempenho e eficiência para assegurar uma posição competitiva no mercado. Com o intuito de atender a estas exigências, cada vez mais empresas e indústrias recorrem aos benefícios da flexibilidade [12], adotando e aplicando, gradualmente, o conceito de produção flexível [11]. Os paradigmas de produção que fazem uso do conceito de flexibilidade como estratégia de atuação e, mais que isso, como característica intrínseca a todos os seus níveis, têm como objetivo lidar com estes desafios de forma eficiente e, principalmente, lucrativa [11].

De facto, a flexibilidade tem sido um ponto fulcral aquando da conceção de sistemas adequados às atuais exigências do mercado. As atividades de investigação neste domínio promovem um paradigma que visa fornecer sistemas de produção mais responsivos através da aplicação dos conceitos de flexibilidade e reconfigurabilidade, com especial foco no nível de automação empregue [13]. Contudo, suscitam-se questões ainda não completamente esclarecidas. Enquanto uns adotam uma abordagem centrada na completa introdução da automação no sistema, definindo e atribuindo o máximo número de operações às máquinas, outros defendem que os humanos são ainda a melhor maneira de alcançar a flexibilidade.

Apesar da tendência em afastar as duas formulações, o desenvolvimento de um sistema flexível não implica prescindir de uma para adotar a outra. Em vez disso, o sistema deve ser projetado de modo a unificá-las, aliando as características vantajosas de ambas para alcançar elevados níveis de desempenho. Os princípios da cooperação homem-máquina são aplicados neste sentido. Através da distribuição eficiente da mão de obra, as características de flexibilidade do sistema podem ser ampliadas, ampliando também o seu desempenho [13]. Baseando-se nestes conceitos e princípios, a presente dissertação visa contribuir para o fornecimento de uma solução eficaz que possibilite a alocação eficiente da mão de obra no sistema, com diferentes níveis de envolvimento identificados

pelos níveis de automação. O objetivo é propor uma abordagem metodológica centrada na integração adequada de homens e robôs para otimizar a flexibilidade dos sistemas de montagem. Os resultados apresentados destacam as vantagens da aplicação de metodologia.

Neste primeiro capítulo, inicialmente, são apresentados alguns conceitos-chave para ilustrar e contextualizar o problema abordado na dissertação. Será realizada uma breve descrição dos diversos paradigmas de produção bem como dos pressupostos e bases para o desenvolvimento adequado de um sistema RAS (*Reconfigurable Assembly System*). Por fim serão especificadas e clarificadas algumas questões objetivas, delineando estratégias para alcançar a satisfação dos requisitos expostos.

1.1 Contexto

1.1.1 Evolução dos Paradigmas de sistemas de Produção

A produção é uma dos principais meios de geração de riqueza, sendo, portanto, natural que seja alvo de constante evolução e desenvolvimentos. Como resultado vários paradigmas tem vindo a ser desenvolvidos e propostos, cada um visando diferentes objetivos definidos pelas exigências do mercado aquando da sua introdução [14]. Assim, as suas implementações relacionam-se com diferentes estratégias. Enquanto, por um lado, todos apresentam estratégias individuais para atender a determinados requisitos, por outro lado, pode-se dizer que nenhum deles aplica simultaneamente todas as estratégias para atender a todos os requisitos [15].

• Sistemas Dedicados - *Dedicated Manufacturing Systems* (DMS)

Historicamente, o primeiro paradigma de produção a ser introduzido foi o paradigma da produção em massa. Este caracterizava-se pela produção em grandes quantidades e pelo foco na redução dos custos de produção, recorrendo aos chamados Sistemas de Produção Dedicados (DMS) ou Rígidos. As componentes principais de um sistema dedicado são "linhas dedicadas/de transferência", "estações de montagem" e "processos de automação dedicados" [16].

Segundo Koren (1999) [17], as linhas dedicadas (DML), ou "linhas de transferência", são caracterizadas pela utilização de automação de baixo custo para promover a produção, em larga escala, dos produtos "core" da organização. Linhas deste tipo são, tipicamente, destinadas à produção de uma única parte/componente, sendo portanto consideradas "linhas rígidas". A atuação simultânea de diversas ferramentas ao longo das várias estações de trabalho possibilita uma elevada taxa de produção. Em termos de eficiência e custo de produção, este tipo de linhas apresenta um desempenho diretamente dependente da procura, ou seja, enquanto a procura for superior à oferta, e enquanto a linha for capaz de operar à capacidade total, a eficiência da linha é elevada e o custo de produção reduzido [17].

De seguida, surge o paradigma "*Lean Manufacturing*", um conjunto sistemático de princípios, métodos e práticas que visa o desenvolvimento de sistemas caracterizados pela combinação de atributos da produção artesanal (produtos de alta qualidade, feitos sob medida) e produção em massa (produção em grandes quantidades e baixo custo de produção), e capazes de produzir ao

ritmo da procura do mercado com pouco ou nenhum desperdício. Os princípios-chave são elevados padrões de qualidade alcançados de imediato - *first-time quality*, minimização de resíduos através da remoção de todas as atividades que não agregam valor, melhoria contínua, flexibilidade e relacionamentos de longo prazo. Várias práticas eficientes de gestão são incorporadas, entre elas, *just-in-time* (JIT) e gestão total da qualidade - *Total Quality Management* (TQM) [14, 16].

- **Cellular Manufacturing Systems (CMS)**

Visando o aumento da produtividade, surge o paradigma de implantação celular, Cellular manufacturing systems (CMS). Aqui, o conceito de célula pode ser definido como um grupo de estações de trabalho, máquinas ou equipamentos organizados de modo a que o produto possa ser processado progressivamente ao longo das estações de trabalho sem que haja necessidade de esperar por outros lotes ou deter stocks intermédios para ser concluído [14]. O conceito de “*group technology*”, introduzido em 1970, é frequentemente utilizado no design deste tipo de sistemas. Este diz respeito ao processo de estudar uma grande população de diferentes partes e, de seguida, agrupá-las em famílias lógicas com características similares de modo a que possam ser produzidas pelo mesmo grupo de máquinas, ferramentas e operários, acarretando apenas alterações mínimas em termos de procedimentos e *set-ups* [14].

Sistemas deste tipo combinam as vantagens de uma configuração direcionada ao produto, às quais se associam a presença de flexibilidade e uma taxa eficiente de utilização de equipamentos, e de um sistema organizado por processo, caracterizado pela motivação da mão-de-obra.

- **Sistemas de Produção Flexíveis - Flexible Manufacturing Systems (FMS)**

Finalmente, o conceito de sistemas de produção flexíveis pode ser descrito como “um sistema de produção com hardware fixo e software fixo, porém programável, capaz de lidar com mudanças em diversos níveis do sistema, tais como ordens de produção e planeamento da produção para diversos tipos de partes” [16].

Koren (1999) [17] define o conceito de linhas de produção flexíveis, caracterizando-as pela capacidade de produzir diversos produtos com parâmetros variáveis de volume de produção a partir do mesmo sistema. O autor refere ainda que, no caso destas linhas, normalmente é necessário um investimento inicial acentuado em termos de equipamentos. Devido à restrição de “*single-tool operation*”, ou seja, impossibilidade de operação de mais que uma ferramenta em simultâneo, o *throughput* associado torna-se reduzido e, ao ser combinado com o elevado custo de aquisição de equipamentos, acarreta custos de produção por unidade relativamente elevados.

1.1.1.1 Desvantagens dos Paradigmas Convencionais

Após definir e caracterizar os diversos paradigmas existentes, torna-se possível tecer algumas considerações relativamente às limitações inerentes a cada um.

Por um lado, Koren (1999) [17] refere que a principal desvantagem associada ao conceito de sistemas dedicados (DMS) é o facto de, devido à sua rigidez, se verificar a impossibilidade de lidar com flutuações na procura e de suportar tempos de ciclo variáveis. Setchi (2004) [14] completa a constatação anterior afirmando que sistemas deste tipo não são escaláveis, uma vez que têm tempos de ciclo e capacidade limitados. Por outro lado, o custo de produção apenas

é baixo desde que os sistemas operem em plena capacidade, o que significa que são eficientes apenas enquanto a procura exceder a oferta. Uma vez que, atualmente, o mercado caracteriza-se por excesso de capacidade e grandes flutuações na procura, torna-se evidente que DMS não oferecem uma solução eficiente [14].

Por seu lado, os CMS, ao serem projetados considerando um conjunto fixo de famílias de produtos, são orientados para a estabilidade na procura e longos ciclos de vida de produtos. Estes são estruturalmente inflexíveis, o que implica que as alterações a nível de design e *layout* são muito dispendiosas dificultando, assim, a aquisição de uma maior variedade de produtos. Consequentemente, CMS não sugerem uma solução economicamente eficiente para flutuações no volume de produção [14].

Por fim, em relação aos sistemas flexíveis, embora tenham sido introduzidos com elevadas expectativas, estes não foram amplamente aceites no setor. Koren (1999) [17] refere que o elevado custo associado a este tipo de sistemas compreende uma das maiores razões para a resistência e desaceitação relativamente à sua implementação. O autor explica que devido ao fato de as aplicações específicas do sistema não serem conhecidas a priori pelos fabricantes dos equipamentos, os sistemas flexíveis são construídos de modo a possuir todas as funcionalidades possíveis, seguindo o pressuposto de que um FMS deve ser capaz de produzir "(1) Qualquer parte (2) em qualquer *mix* de partes e (3) em qualquer sequência". Assim, apesar de serem escaláveis e capazes de suportar diferentes variedades de produtos, o elevado nível de complexidade associado acarreta, de forma direta, um elevado desperdício de capital. Além disso, requer o emprego de pessoal altamente qualificado, o que potencia ainda mais os custos associados [14]. Outra desvantagem associada a este tipo de sistemas é o fato de poderem ser considerados obsoletos, já que as suas componentes de hardware e software são pré-determinadas e fixas. Assim, pode-se concluir que não são adequadamente responsivos às mudanças, já que as suas capacidades em termos de atualização e customização acabam por ser limitadas.

Mehrabi (2002) [18] conduz uma investigação onde é possível constatar que, por um lado, dois terços dos profissionais que participaram no estudo e que tiveram alguma experiência com sistemas flexíveis, não acredita que estes estão a cumprir com o esperado. Por outro lado, permite verificar a existência de muitas empresas que mantêm o interesse neste tipo de sistemas, apresentado-se dispostas a adquirir ainda mais sistemas deste tipo. Tal fato torna possível concluir que a indústria necessita e procura um sistema que aplique o conceito de flexibilidade de forma eficiente e eficaz e que, embora os sistemas flexíveis tenham apresentado um sucesso limitado, o objetivo que estes se propõem a cumprir é relevante.

A tabela 1.1 resume os objetivos e limitações associadas aos DMSs, CMSs e FMSs.

1.1.1.2 Necessidade de Sistemas Reconfiguráveis

Uma vez identificadas as limitações de cada um dos tipos de linha, torna-se intuitivo conceitualizar um sistema capaz de as ultrapassar. Por um lado, este deve incorporar as vantagens das linhas tradicionais, ou seja, elevado *throughput* e baixo custo, característicos das linhas dedicadas, e flexibilidade, característica dos sistemas flexíveis, originando um sistema responsivo, eficaz e

Tabela 1.1: Sumário de objetivos e limitações dos diferentes paradigmas de sistemas

| <i>Tipo de Sistema</i> | <i>Objetivos Económicos</i> | <i>Desvantagens</i> |
|------------------------|---|--|
| Sistemas Dedicados | Produção a baixo custo de um tipo de produto específico, com elevados volumes de produção e elevados padrões de qualidade. | Inflexível ; Capacidade fixa; Variedade de Produtos fixa; Não é escalável; Não é responsivo; Obsoleto |
| Sistemas Celulares | Configuração direcionada ao produto que combina as vantagens da presença de flexibilidade, taxa eficiente de utilização de equipamentos e motivação da mão-de-obra. | Inflexível; Capacidade fixa; Variedade de Produtos fixa; Máquinas duplicadas; Não é responsivo; Obsoleto |
| Sistemas Flexíveis | Tornar possível o fabrico rentável de vários tipos de peças, segundo requisitos frequentes e imprevisíveis de mudanças e tempos reduzidos de transição entre variantes produtos, no mesmo sistema com o volume e a qualidade necessários. | <i>Throughput</i> reduzido; Elevada complexidade associada; Não é responsivo; Obsoleto; |

economicamente eficiente. Por outro lado, deve atender a objetivos que vão além dos alcançados pelos sistemas tradicionais [16]. Entre eles, redução do lead-time necessário para projeção de novos sistemas e reconfiguração de sistemas existentes, e rápida integração de novas tecnologias de processo e novas funcionalidades.

Sistemas de produção com estas características são designados na literatura por sistemas de produção Reconfiguráveis - RMS. Bi (2008) [15], após identificar e explorar os requisitos e estratégias relacionados com os diversos paradigmas de sistemas de produção, o autor conclui que os sistemas RMS correspondem a um dos paradigmas mais eficazes na satisfação dos requisitos de produção que vigoram atualmente. Neste sentido, é possível afirmar que explorar e introduzir o conceito de reconfigurabilidade em sistemas de produção é uma estratégia que mostra-se cada vez mais promissora.

1.1.2 Sistemas Reconfiguráveis - Reconfigurable Manufacturing Systems (RMS)

1.1.2.1 Conceito

O conceito de RMS foi introduzido em meados dos anos 90 como uma resposta economicamente eficaz às demandas do mercado em termos de capacidade de resposta e customização [14]. Apesar de, atualmente, ainda não possuir uma definição absoluta, é inquestionável constatar e perceber que o conceito de RMS foi proposto com o objetivo de atender às mudanças e incertezas do ambiente de produção, através da aplicação do conceito de reconfiguração de recursos tanto a nível de hardware como de software.

Koren (1999) [17], apresenta uma definição sucinta de Sistemas Reconfiguráveis - "Um sistema de produção reconfigurável é concebido desde o início para lidar com mudanças rápidas

na estrutura, bem como em componentes de hardware e software, a fim de ajustar rapidamente a capacidade de produção e funcionalidades do sistema dentro de uma família de partes em resposta a mudanças súbitas no mercado ou em requisitos regulamentares. Bi (2008) [15] estende a definição de Koren, definindo um RMS como um sistema que apresenta capacidade de reconfiguração de hardware e controlo de recursos de forma transversal a todos os níveis, tanto funcionais como organizacionais. Mehrabi (2002) [18] argumenta que a "Este tipo de sistema oferece flexibilidade personalizada para uma família de peças específica e deve ser aberto, para que possa ser melhorado, atualizado e reconfigurado, em vez de ser substituído".

Sistemas deste tipo são projetados para lidar com situações onde tanto a produtividade como a capacidade de reação à mudanças assumem vital importância. Como referido anteriormente, estes foram conceptualizados para unificar as vantagens das linhas tradicionais, ultrapassando as desvantagens. A responsividade surge através do fornecimento de uma estrutura modular ajustável, escalável e flexível, capaz de ser reorganizada de forma rápida e fiável [16]. O baixo custo, por sua vez, é conseguido pelo foco na família de produtos e preocupação com a especificação e individualização da flexibilidade a introduzir [17]. Em vez de possuir a flexibilidade generalizada característica dos sistemas flexíveis, sistemas reconfiguráveis são projetados para utilizar apenas a flexibilidade necessária para lidar especificamente com membros de uma família de produtos [19]. Tal sistema irá permitir a aplicação de flexibilidade não só na produção de uma variedade de produtos e partes, mas também na introdução de alterações no sistema em si [16].

1.1.2.2 Características

A arquitetura de um sistema RMS é rigorosa e implica a inclusão de uma série de princípios fundamentais e indispensáveis, resumidos recorrendo à elaboração de cinco características principais [14–17]:

Modularidade: Em sistemas RMS todos as componentes principais do sistema, tanto a nível de hardware como de software, são modulares. O termo é usado para descrever a utilização de unidades comuns para criar variantes. Os benefícios da inclusão deste princípio incluem economia de escala, maior viabilidade para futuras mudanças no produto/componentes, aumento da variedade de produtos, redução de prazos de entrega e otimização das capacidade de diagnóstico, manutenção e reparo do sistema.

Integrabilidade: O sistema e suas componentes são projetados com interfaces adequadas, de forma a permitir tanto a integração imediata como futura de novas tecnologias.

Conversibilidade: Uma das principais exigências dos sistemas RMS corresponde à utilização de tempos de conversão curtos entre os diferentes lotes de produção/variantes do produto. Para tal, é necessário que o sistema seja capaz de realizar um ajuste rápido de recursos, tanto a nível de hardware como de software. É imperativo que o sistema seja capaz de possibilitar a troca rápida entre produtos existentes e seja rapidamente adaptável para introdução de novos produtos. Aqui, o trabalho manual surge como uma solução eficiente.

Capacidade de diagnóstico: O sistema deve ser capaz de identificar rapidamente as fontes de problemas de qualidade e fiabilidade que podem ocorrer. Uma vez que a modularidade é empregue, a deteção e identificação das causas do comportamento anormal torna-se relativamente fácil. Por outro lado, a convertibilidade pressupõe modificações frequentes de diferentes componentes (hardware e software). Posto isto, a monitorização é essencial para garantir a eficiência do sistema [14].

Customização: Uma das principais diferenças entre os FMS e RMS é a habilidade de estes últimos serem personalizados em termos de capacidade e flexibilidade (hardware e controlo). Flexibilidade personalizada significa que o hardware é implementado segundo as aplicações específicas do sistema, ou seja, apenas é fornecida a flexibilidade necessária correspondente às famílias de produtos que são fabricados. O controlo personalizado, por sua vez, é alcançado através da integração de módulos de controlo que fazem uso de tecnologias de arquiteturas abertas capazes de fornecer as funções de controlo exatas, necessárias para lidar com a família de produtos [20].

As influências destas características nos requisitos do sistema foram discutidas por Mehrabi (2000) [16]. Em suma, modularidade, integrabilidade e capacidade de diagnóstico atuam na redução do tempo e esforço na realização do ato de reconfiguração, enquanto customização e convertibilidade atuam na redução dos custos associados. Assim, é possível concluir que as características acima definidas determinam o custo da aplicação do conceito de reconfigurabilidade num determinado sistema e a facilidade relativamente à sua introdução. Um sistema que possua estas características possui um elevado nível de reconfigurabilidade.

1.1.3 Drivers dos sistemas RAS

É essencial notar que, os requisitos para um determinado sistema de produção podem ser muito variáveis, já que envolvem diversos aspetos. A identificação das razões do interesse no desenvolvimento de sistemas reconfiguráveis vem sendo alvo de esforços por parte de vários pesquisadores. Em Bi (2007) [21], após realizar uma compilação e posterior comparação dos diferentes “motores” discutidos por outros pesquisadores, o autor confere particular importância a um deles: mudanças e incertezas.

O ambiente produtivo imposto pelo mercado apresenta um papel determinante nas decisões que suportam um sistema de produção, assumindo um grande impacto na performance alcançada. Atualmente, e cada vez mais, este vem sendo alvo de diversas e constantes mudanças que, mesmo que ocorram externamente ao sistema de produção, propagam-se, inevitavelmente, para o seu interior obrigando a que estes sejam capazes de atuar em conformidade com as mesmas [21].

"Mudanças apenas podem ser tratadas com mudanças" [21]. No âmbito de sistemas de produção, tipicamente, existem duas maneiras de possibilitar mudanças: Flexibilização e Modularização. Por um lado, o conceito de sistema flexível assenta na utilização de componentes caracterizadas pela sua capacidade de mudar de comportamento para atender à possíveis mudanças de requisitos. Um exemplo típico de um sistema desenvolvido a partir do conceito de sistema flexível são os robôs industriais. Por outro lado o conceito de sistema modular refere-se à utilização de

componentes modulares sob uma arquitetura modular. Um sistema deste tipo é capaz de gerar diferentes configurações do sistema que variam com a adição, remoção ou permutação de módulos ou conjuntos de módulos. Como tal, o horizonte de tarefas que podem ser cumpridas aumenta de forma praticamente indefinida [21].

Num sistema RAS, os dois conceitos acima mencionados apresentam-se integrados. Por um lado, uma vez que apresenta a possibilidade de adição ou remoção de módulos com base nos requisitos de capacidade, este é considerado um sistema modular. Por outro lado, uma vez que os módulos são capazes de atender a diferentes requisitos de produção tanto ao nível da máquina como de ferramentas, são considerados flexíveis. A implementação destes dois conceitos melhora a capacidade do sistema para atender à mudanças e lidar com incertezas.

1.2 Motivação

Atualmente, e cada vez mais, a flexibilidade aplicada à produção é tida como um dos principais objetivos estratégicos de grande parte das indústrias do setor produtivo. Diversos autores afirmam que o conceito de flexibilidade têm-se igualado, em termos de relevância, aos objetivos tradicionalmente "core" das empresas, que correspondem ao custo, qualidade e tempo de entrega. No passado, a procura era mais estável, a variedade de produtos era consideravelmente menor e os ciclos de vida consideravelmente maiores e, a rivalidade entre a concorrência não era um fator tão evidente e determinante. Agora, a capacidade de absorver as flutuações na procura, de desenvolver e introduzir novos produtos rapidamente e, a necessidade de adotar abordagens de melhoria contínua para alcançar, e principalmente manter, elevados níveis de eficiência e níveis de qualidade diferenciados e atrativos, são vistas como importantes questões competitivas. Tais considerações e requisitos têm sido um catalisador para o crescente interesse na flexibilidade de produção.

A competitividade industrial, frequentemente, depende da capacidade da indústria para reconfigurar sistemas de montagem. Por um lado, o envolvimento humano alargado e estruturado contribui para aumentar a capacidade de lidar proativamente com eventos imprevisíveis, por outro lado, os crescentes desenvolvimentos em tecnologias de processos e robótica aplicados à produção permitem converter limitações em capacidade e competências. O envolvimento correto dos operadores humanos no sistema possibilita a utilização do potencial combinado das capacidades humanas e técnicas, proporcionando soluções de sistemas de montagem extremamente eficientes e rentáveis.

Apesar de, na grande maioria dos locais de trabalho haver um compartilhamento próximo de tarefas entre pessoas e máquinas, a forma como estas estão repartidas nem sempre é estudada. Muitas vezes, esta é uma decisão feita de forma inconsciente, negligenciando a possibilidade de equilibrar e potencializar a cooperação. Safsten (2007) [6] salienta que a atribuição de funções entre sistemas humanos e técnicos é uma questão longe de trivial e que, embora iniciativas e esforços tenham sido empreendidos, as aplicações de alocação de funções no contexto da indústria de produção são ainda limitadas.

Assim, o desenvolvimento de métodos que possibilitem utilizar plenamente os potenciais fornecidos pela automação e, ao mesmo tempo, considerar as possíveis vantagens de integrar operadores de forma cooperativa através de diferentes níveis de automação é uma oportunidade que, devido ao elevado potencial, apresenta perspectivas extremamente promissoras de exploração.

1.3 Objetivos

O objetivo principal da presente dissertação é proporcionar aos pesquisadores envolvidos na concepção de sistemas de montagem flexíveis, mais particularmente, sistemas reconfiguráveis, uma ferramenta capaz de auxiliar a otimização da performance do sistema. O objetivo subjacente é explorar o modo como o conceito de níveis de automação pode ser aplicado a este tipo de sistemas, de modo a promover a alocação eficiente de operações de montagem entre homem e robô, utilizando as suas vantagens e capacidades na medida mais elevada possível, segundo uma perspectiva centrada na cooperação.

Ao converter os objetivos apresentados em questões que a presente dissertação visa responder, as seguintes questões de pesquisa foram elaboradas:

- 1. Sendo substancialmente distintas, em que medida as características e capacidades individuais de cada um destes tipos de recurso (mão de obra humana e automática) influenciam as operações de montagem?**
- 2. Se a cooperação entre homens e máquinas é vantajosa, de que forma esta pode ser aplicada de modo a otimizar a performance de sistemas que pretendam aumentar o seu nível de flexibilidade?**
- 3. Se os níveis de automação podem ser medidos, que consequências a definição de um determinado nível acarreta no desempenho de uma operação específica?**

A investigação realizada não ambiciona nem pretende o fornecimento de respostas ou soluções absolutas, mas contribuições úteis para implementações em casos reais.

1.4 Metodologia

Ao iniciar a pesquisa com o intuito de responder às questões elaboradas com base em considerações teóricas, a abordagem metodológica inicia-se com uma análise dedutiva. O primeiro passo correspondeu à realização de uma investigação exaustiva que possibilitasse delinear as necessidades atuais dos sistemas de produção e as possibilidades de atuação do fator flexibilidade no sentido de as satisfazer. Foi possível verificar que os sistemas reconfiguráveis abordam diferentes objetivos e estratégias, sendo necessários processos de tomada de decisão muitas vezes conflituosos. Tal fato justifica a necessidade da introdução de um nível de automação orientado à organização, alcançado através da alocação correta da mão de obra.

Após a realização desta fase tornou-se possível delinear os pontos onde a metodologia deve atuar como proposta de solução. Definiu-se então que a metodologia focar-se-ia na formulação de uma estratégia para alocação eficiente de tarefas entre homem e máquinas, segundo diferentes níveis de automação, de forma a otimizar a performance em cada uma das operações e os princípios de reconfigurabilidade do sistema.

A definição do objetivo foi, de seguida, utilizada para direcionar a segunda fase da pesquisa. Esta segunda fase correspondeu à busca por estratégias implementadas e pela análise dos resultados obtidos. Dado a elevada componente conceptual presente nesta dissertação, esta fase apresenta um carácter maioritariamente qualitativo, com foco na definição de termos e distinção entre taxonomias e características.

Após a fase de coleta e análise de informação, o passo seguinte foi realizar uma compilação das estratégias e técnicas que melhor se aplicam no âmbito de sistemas de montagem flexíveis, de modo a serem usadas como base para o desenvolvimento de uma metodologia bem fundamentada e orientada ao problema.

A fase final correspondeu ao procedimento de avaliação da eficácia da metodologia na satisfação do objetivo delineado. Para tal, a metodologia foi aplicada a um caso de estudo real. A análise foi realizada ao comparar, por meio de técnicas de simulação, a proposta corrente para conceção da linha e solução resultante da aplicação da metodologia.

1.5 Estrutura da Dissertação

Para além do capítulo introdutório, a presente dissertação contém mais 4 capítulos. No capítulo 2 é apresentado o estado da arte que, fornece uma visão alargada dos avanços tecnológicos, técnicas e métodos envolvidos na introdução dos conceitos de flexibilidade, reconfigurabilidade e cooperação no âmbito de sistemas de produção. No capítulo 3, a metodologia proposta é apresentada e os processos envolvidos no desenvolvimento de cada uma das etapas são devidamente justificados e esclarecidos. O capítulo 4 corresponde à aplicação da metodologia a um caso de estudo para demonstração e análise de resultados. O capítulo 6 ilustra a avaliação dos resultados obtidos no capítulo 5, recorrendo a aplicação de técnicas de simulação. Por fim, o capítulo 6 encerra a dissertação com a exposição dos resultados e conclusões mais relevantes e recomendações para trabalhos futuros promissores passíveis de serem aplicados à abordagem proposta.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Os sistemas de montagem de hoje lidam com a imperatividade de incorporar o conceito de flexibilidade de forma transversal a todos os seus níveis e processos. Para alcançar este objetivo, elevados esforços vêm sendo empregues por investigadores num processo intensivo de procura por soluções inovadoras e eficazes, levando a que uma série de novos paradigmas sejam propostos e implementados. Entre eles os sistemas flexíveis e reconfiguráveis, aparecem na literatura como alguns dos mais populares e promissores.

Apesar de, nos últimos tempos, terem recebido uma considerável atenção quando comparados com outros paradigmas do setor, tais conceitos são consideravelmente amplos e generalistas [21]. Estes englobam diversos elementos que se relacionam de diversas maneiras, tornando-se inviável incluir e analisá-los na sua totalidade. Assim, o presente Estado da Arte abordará um conjunto de tópicos cuidadosamente selecionados. Inicialmente, será dada uma visão abrangente do conceito de sistemas de produção e sistemas de montagem, de modo a promover uma familiarização com a aplicação prática destes conceitos ao longo dos anos. De seguida, é realizada uma abordagem mais direcionada ao foco da presente dissertação.

O procedimento de pesquisa realizado e abordagem utilizada para seleção da informação pode ser apresentada com um ciclo. Inicialmente, procedeu-se à seleção de palavras-chave relevantes no âmbito da pesquisa e iniciou-se o ciclo recorrendo a ferramentas de pesquisa online, como o *Google Scholar*, *Science Direct*, *Springer Link* e *Scopus*. Os artigos encontrados foram então analisados segundo esta sequência: Resumo e Introdução, Conclusão e descrição da abordagem. Quando encontrados aspectos valiosos durante este primeiro passo da análise, a referência foi assinalada para uma análise posterior, mais detalhada. Todos os documentos assinalados foram agrupados segundo a temática principal.

A partir da seleção dos artigos de maior interesse, foram analisadas as referências e selecionadas citações para realização de uma busca por trabalhos mais recentes que pudessem estar relacionados.

Após reparar que as referências entre os artigos começaram a verificar-se redundantes, e os livros e artigos resultantes da busca por citações começaram a tornar-se repetitivos, esta fase deu-se por terminada e iniciou-se uma análise mais detalhada e exaustiva dos documentos selecionados.

As palavras chave utilizadas foram as seguintes: *assembly systems; reconfigurable assembly systems; assembly automation; task allocation; levels of automation; human-machine cooperation*;

2.1 Sistemas de Produção

Um sistema de produção inclui todas as atividades necessárias para introduzir um produto no mercado. Estas podem ser agrupadas segundo três classes principais: Conceção (*design*), que corresponde a definir todas as componentes do sistema e, com base nos requisitos e necessidades dos clientes, elaborar os procedimentos e etapas de montagem necessários; Produção (*manufacturing*), que corresponde ao fabrico das partes básicas e componentes do produto final; e Montagem - (*assembly*), que corresponde à integração de todas as componentes e partes básicas para compor o produto final [21].

Apesar de todas corresponderem a partes essenciais do processo de produção, os processos de montagem assumem uma particular importância. Em termos estatísticos, a percentagem de trabalhadores envolvidos nestes processos pode chegar até 60% do número total de trabalhadores empregues, o tempo de produção corresponde a 20% do tempo total de produção e os custos associados podem corresponder até 50% do custos totais [11, 21]. Na indústria automóvel, 20 a 70% dos custos diretos de mão-de-obra é despendido em processos de montagem [11]. Estes dados confirmam a importância da montagem e apontam para a potencial redução de custos que pode ser alcançada através de investimentos na otimização de sistemas de montagem.

2.1.1 Sistemas de Montagem - *Assembly Systems*

No âmbito da gestão da produção, o conceito de “montagem”, inclui todos os processos e equipamentos necessários para “unir, configurar, alinhar, orientar e ajustar componentes e materiais para produzir um produto final” [21]. Enquanto conjunto de processos que apresenta uma finalidade bem definida e cumpre necessidades declaradas este é abrangido pela definição de sistema. Assim, um sistema de montagem pode ser considerado um sub-sistema de um sistema de produção [22], sendo definido como a porção do sistema de produção responsável por executar os processos de montagem [21]. Um processo de montagem pode ser definido como um processo que combina partes, transformando-as num produto final [3] e uma linha de montagem como um sistema de montagem que, tradicionalmente, consiste num conjunto de estações de trabalho (*workstations*) conectadas entre si e dispostas ao longo de um mecanismo de transporte de materiais segundo uma configuração específica, previamente estipulada, que respeita a sequência de operações necessárias à realização dos processos de montagem. Os produtos/componentes são movidos de estação para estação num fluxo unidirecional e, em cada estação, determinadas operações são repetidamente executadas respeitando um tempo de ciclo pré-definido. [1, 7, 23].

Os sistemas de montagem desempenham um papel crítico na qualidade do produto, na produtividade do sistema e no custo da produção [7]. Na medida em que se verifica uma diferença significativa em termos de condições, princípios e prioridades apresentadas pelos sistemas de produção

atuais, os sistemas de montagem correspondentes tendem a ser multifacetados e variados nas suas características e propriedades. Assim, desde os tempos de Henry Ford, pioneiro na introdução e aplicação do conceito de linha de montagem, diversos desenvolvimentos vêm sendo realizados, atuando na evolução do modelo original. Uma série de novos paradigmas vêm sendo desenvolvidos, tornando necessária a consideração de inúmeros fatores para proceder à sua classificação de forma apropriada e completa [3]. No artigo de Becker (2006) [1], duas propriedades são identificadas como relevantes e essenciais na classificação de linhas de montagem, correspondendo estas ao ritmo da linha e ao número de produtos operados. Em [Heilala 2001], o autor propõe uma classificação dos princípios utilizados em linhas de montagem segundo o nível de automação empregue nas mesmas. Este critério, em especial, apresenta uma maior relevância no âmbito da presente dissertação e, por isso, será alvo de uma investigação posterior mais aprofundada.

A figura 2.1 sumariza os diferentes tipos de sistemas de montagem segundo os diferentes critérios referidos que, de seguida, serão brevemente elucidados.

| | | | | |
|--------------------------------|--------------|-----------------|----------|-------------|
| Ritmo da Linha | paced | | unpaced | |
| Número de variantes de produto | single model | mixed model | | multi model |
| Nível de Automação | manual | semi-automática | flexível | dedicada |

Figura 2.1: Tipos de Sistema de Montagem (Adaptado de [1])

- Ritmo da Linha:** Se numa linha de montagem, o tempo de operação de todas as estações é uniforme e limitado ao tempo de ciclo, esta é considerada do tipo “*paced assembly line*”. Por outro lado, se as estações operam à velocidades individuais, estas não partilham o mesmo valor de tempo de ciclo, e passam a ser classificadas como “*unpaced/buffered assembly lines*” [1].
- Número de Variantes de Produtos:** No caso de existir uma única variante a ser operada na linha de montagem, esta é classificada como “*single-model line*”. Por outro lado, quando existem diferentes variantes de um produto a serem manipuladas na mesma linha, dependendo da maneira como a linha organiza a produção das mesmas, esta passa a ser classificada como “*mixed-model line*” ou “*multi-model line*”. Uma linha do tipo “*mixed-model*” produz as unidades das diferentes variantes segundo uma sequência arbitrariamente intercalada, enquanto uma linha do tipo “*multi-model*” produz as unidades em lotes, cada um contendo unidades de apenas uma das variantes [1]. Os referidos tipos de linha são ilustrados na Figura 2.2, onde as diferentes variantes do produto são representadas pelas diferentes formas geométricas.
- Nível de Automação** Em relação ao nível de automação, as linhas de montagem podem ser classificadas em: Linhas de montagem manual (sequencial e paralela); Linhas de montagem semi-automáticas ou Híbridas; Linhas de montagem automáticas flexíveis; e Linhas de montagem automáticas dedicadas. No caso de linhas de montagem manual, o processo de

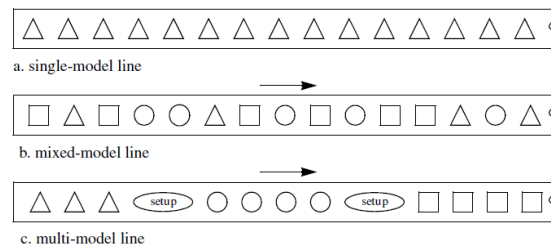


Figura 2.2: Linhas de Montagem para uma e múltiplas variantes de produtos (Fonte: [1])

montagem é efetuado integralmente a partir de mão-de-obra humana. Estas podem ainda ser classificadas como linhas de montagem manual sequencial ou linhas de montagem manual paralela dependendo do princípio de configuração implementado. O Princípio de “*Progressive Building*”, implica que o processo de montagem seja dividido em etapas de menor dimensão, ou seja, tempos de ciclo curtos. A decomposição do processo origina tarefas consideradas de baixa complexidade, não sendo necessário que os operadores possuam um nível de habilidade elevado. A implementação deste princípio origina linhas do tipo manual sequencial. Em alternativa, a implementação do princípio de “*Complete Building*” origina linhas do tipo manual paralelas. Neste caso, o processo de montagem é efetuado recorrendo apenas a um operador/célula de trabalho para realização integral do processo de montagem. Dada a complexidade associada, requer elevados níveis de habilidade dos operadores e trabalhadores multi-qualificados. Linhas de montagem semi-automáticas, ou híbridas, são caracterizadas por apresentar parte do processo realizada manualmente e outra parte de forma automatizada. Em linhas de montagem automáticas flexíveis e em linhas de montagem automáticas dedicadas, o processo de montagem é completamente automatizado [24]. Michalos (2010) [2] faz uso da classificação proposta por Heilala (2001) referindo-se a ela como as quatro principais abordagens para conceção de um sistema de montagem e ilustra os diferentes cenários de performance de sistemas de montagem, em termos de volumes de produção, número de variantes, tamanhos de lote e flexibilidade (Figura 2.3).

O conceito de células de montagem é abordado na literatura segundo dois significados distintos. O primeiro assenta no conceito tradicional de sistema de montagem discreto, porém, caracterizado por possuir uma pequena dimensão. Seguindo esta definição, a diferença entre células de montagem e linhas de montagem assenta, essencialmente, nos mecanismos de fluxo de produtos/componentes. Ao contrário do que acontece no caso de linhas de montagem, células de montagem não utilizam mecanismos de transferência e de transporte como componentes indispensáveis. Além disso, possuem uma menor capacidade produtiva, sendo tipicamente utilizadas para realizar a montagem de uma única família de produtos. O segundo conceito é utilizado para fazer referência a componentes standard das linhas de montagem que, conectadas entre si, compõem a linha [3]

Em termos gerais, células de montagem podem ser classificadas em manuais, automáticas

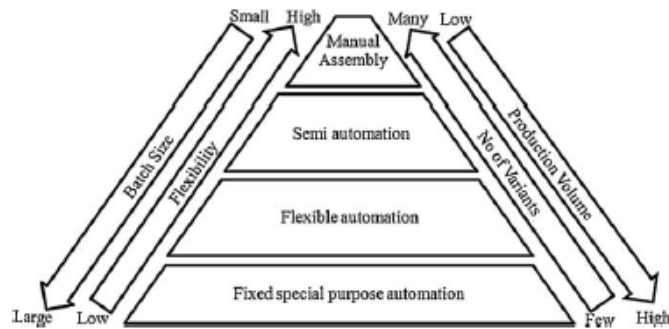


Figura 2.3: Performance de sistemas de montagem segundo os diferentes princípios de montagem (Fonte: [2])

ou híbridas [25]. De forma similar ao que se verifica relativamente à classificação das linhas de montagem, células manuais e automáticas são caracterizadas por empregarem apenas um tipo de mão-de-obra na realização das operações, sendo estas desempenhadas por operadores humanos ou robôs/máquinas, respetivamente. Por sua vez, as células híbridas, também chamadas cooperativas [25], são caracterizadas pela utilização de uma combinação cuidadosa e organizada de ciclos de trabalho automatizados e manuais na execução das operações do processo de montagem. Segundo Kruger (2005) [25], esta combinação pode ser extremamente vantajosa, já que conjuga a velocidade de robôs e máquinas com a flexibilidade de trabalhadores humanos.

2.2 Design e Configuração

O processo de decisão relativo à seleção da estratégia mais vantajosa a ser aplicada aquando da conceção de um determinado sistema de montagem é um fator crítico para qualquer organização. Este envolve uma série de fatores inter-relacionados que, em conjunto, determinam a configuração mais vantajosa para o sistema. Tais fatores devem ser estudados e priorizados segundo os objetivos e restrições individuais de cada sistema. Aspetos físicos como a dimensão do sistema, requisitos espaciais ou tamanho dos lotes e aspetos funcionais como o fluxo de processos, a capacidade do sistema e o número de variantes do produto são exemplos de fatores que assumem uma importância fundamental na tomada de decisão. No entanto, nos dias que correm, o fator "flexibilidade necessária" é, cada vez mais, tido como foco principal por parte das organizações sendo, por isso, apresentado também como foco da presente dissertação.

Um RAS possui diversas alternativas no que diz respeito ao design da configuração do sistema. Como anteriormente referido, o desafio assenta na identificação apropriada dos requisitos de design. Diversos critérios como produtividade, qualidade, custo, conversibilidade e escalabilidade devem ser considerados, quantificados e priorizados para que seja possível alcançar a configuração ótima. [Bi 2007] [21] identifica uma série de processos e abordagens desenvolvidos para auxiliar tal processo de decisão: O Processo de Hierarquia Analítica (Analytic Hierarchy Process - AHP) [26, 27] é frequentemente utilizado para auxiliar a seleção de requisitos. Manzini et al.

(2004) [28] desenvolve uma *framework* para simultaneamente realizar os processos de concepção e controlo de um sistema de montagem flexível, ágil, reconfigurável e robusto em conjunto com a análise e otimização de produtos, processos, estrutura do sistema, dispositivos de manuseio de materiais e layout da planta. Yigit e Allahverd (2003) [29] desenvolvem uma formulação matemática para o projeto de configuração de um sistema reconfigurável como um problema de programação não-linear inteira para evidenciar a dicotomia relacionada com a escolha entre a perda de qualidade devido à modularidade e o custo de reconfiguração para um determinado conjunto de requisitos do cliente.

2.2.1 Aplicação do conceito de flexibilidade em sistemas de montagem

Sistemas flexíveis de produção foram introduzidos em resposta ao surgimento de uma procura muito exigente por mais variedade e, consequentemente, maior capacidade de resposta às mudanças nos produtos, tecnologias de produção e mercados. O objetivo de um FMS é alcançar simultaneamente produtividade e flexibilidade, incorporando a capacidade de realizar, num único sistema, o fabrico de diversos tipos de peças (que podem mudar ao longo do tempo), com tempos de conversão curtos, no volume e qualidade exigidos [7, 30].

Em [31] uma extensa e compreensiva revisão da literatura é utilizada para examinar todas as questões envolvidas na aplicação do conceito de flexibilidade em sistemas de produção, englobando definições, tipos e métodos de medição. Uma série de definições são apresentadas. Embora possuam ligeiras variações, todas elas assentam no mesmo ponto essencial: Capacidade de responder à mudanças e de acomodar incertezas. Em geral, a direção apontada pela literatura relativamente às diferentes definições de "sistema de montagem flexível" giram, principalmente, em torno do nível de automação implementado no sistema [2, 24] ou da sua capacidade para processar diferentes misturas de produtos. Nesse sentido, o conceito de flexibilidade pode ser diferenciado em dois tipos principais: Flexibilidade de Capacidade, que diz respeito à sua capacidade de reagir às exigências do mercado em termos de volume de produção, e Flexibilidade de Competências, que se refere à habilidade de reagir às mudanças relacionadas com a introdução de novos produtos ou variantes de produtos solicitados pelo mercado [24].

Além destes, muitos outros tipos de flexibilidade são definidos na literatura. Sethi et al. (1990) [32] identificam onze tipos como os mais predominantemente aplicados em sistemas de produção: *Machine Flexibility*, *Material Handling Flexibility*, *Operation Flexibility*, *Process Flexibility*, *Product Flexibility*, *Routing Flexibility*, *Volume Flexibility*, *Expansion Flexibility*, *Control Programme Flexibility*, *Production Flexibility*, *Market Flexibility*; [Asadi 2015] [22] faz uso deste estudo ao explorar e avaliar a aplicação de cada um dos referidos tipos em casos reais de sistemas de montagem flexíveis, concluindo que, na perspetiva da indústria, os tipos considerados mais relevantes correspondem a *Material Handling Flexibility*, *Volume Flexibility*, *Control Programme Flexibility* e *Market Flexibility*.

Devido às frequentes mudanças nos modelos de produtos que se têm verificado, dispor de elevada flexibilidade é indispensável tanto em sistemas manuais como em sistemas automáticos [3]. Enquanto, por um lado, alguns investigadores consideraram que um sistema de montagem flexível

é definido como um sistema equipado com uma série de diferentes máquinas automatizadas ou robôs a operarem na linha, outros consideram a montagem manual um fator decisivo na obtenção de elevados níveis de flexibilidade no sistema de montagem [24]. Para Löffler (1986) o conceito de flexibilidade é incluído na classificação dos sistemas de montagem. O autor realiza uma análise referente ao volume de produção e complexidade do produto, classificando-os, segundo os referidos parâmetros, em: Estações de trabalho manuais, Linhas de montagem manuais com transporte automático de componentes, Células de montagem flexíveis, Máquinas automáticas dedicadas, Linhas de montagem dedicadas e Linhas de montagem flexíveis. A figura 2.4 ilustra a classificação proposta.

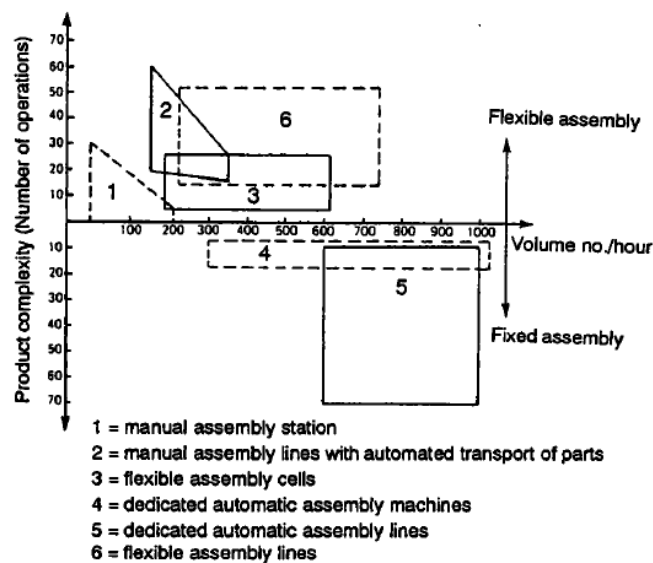


Figura 2.4: Classificação de linhas de montagem

(Source: makino 1994)

Com base na classificação proposta por Lotter (1986), e Makino (1994) [3] constata que células de montagem flexíveis e linhas de montagem flexíveis são usadas numa gama intermédia entre montagem manual e montagem automática dedicada, no que concerne ao volume de produção do sistema. Behuniak (1986) expõe esta relação segundo uma outra perspetiva, analisando a performance dos sistemas em termos de custos, conforme ilustrado na Figura 2.5 [3].

Abordagens mais recentes na literatura revelam diferentes visões relativamente ao fator flexibilidade nos sistemas de montagem. Rosati (2013) [33] introduz o conceito de sistema de montagem totalmente flexível, que consiste num subsistema de alimentação totalmente flexível, uma ou mais estações de montagem flexíveis e um manipulador programável no qual apenas podem ser utilizadas peças encaixáveis para montagem. A introdução de sistemas de transporte inteligentes são considerados desenvolvimentos importantes para otimização da flexibilidade em sistemas de produção. As oportunidades vêm sendo exploradas, originando a implementação de diversos desenvolvimentos. Neste sentido, os sistemas de transporte deixaram de estar restritos a simples

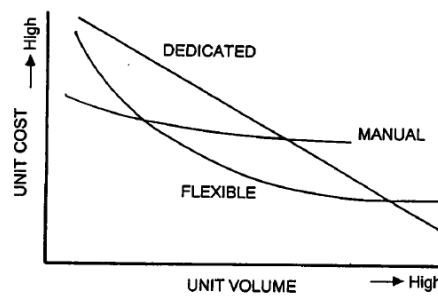


Figura 2.5: Relação Custo-Volume de produção para os diferentes tipos de sistemas de produção (Fonte: [3])

tapetes que se deslocam a uma velocidade constante para se tornarem sistemas complexos capazes de operar rotas variáveis e individualizadas ao longo de caminhos que são adaptados às necessidades específicas do processo de fabrico em questão. A utilização deste novo conceito confere um maior nível de flexibilidade ao sistema na medida em que, por um lado, possibilita a combinação de estações manuais e automáticas ao longo da linha e, por outro lado, permite a combinação de estações de trabalho em série e em paralelo, de modo a obter uma utilização mais eficiente da força de trabalho manual automática em linhas de montagem híbridas, como mostrado por [34].

Após realizar uma exaustiva revisão literária sobre a questão da flexibilidade em sistemas produtivos, [Asadi 2015] [22] refere que embora a montagem seja considerada uma sub-parte fundamental de um sistema de produção, a pesquisa na área de sistemas de montagem flexíveis ainda não é muito desenvolvida e, portanto, sofre de uma maior ambiguidade relativamente ao conceito. Beach (2000) [31] refere que Sethi (1990) [32] observaram a existência de pelo menos 50 termos diferentes para os vários tipos de flexibilidade referidos na literatura. Definições, que, segundo o autor, "nem sempre são precisas e que, por vezes, mesmo a utilizar termos idênticos, não estão de acordo umas com as outras". [Asadi 2015] [22] conclui ser necessário uma investigação mais aprofundada que proporcione uma maior nitidez na clarificação de conceitos e tipos envolventes. Neste sentido, a partir da análise de uma seleção de casos reais, o autor investiga as conjecturas e pressupostos envolvidos na aplicação de flexibilidade em sistemas de montagem e, como resultado, identifica um conjunto de seis constituintes que, segundo o estudo, é suficiente para definir e clarificar o conceito: Abastecimento adaptativo de Material (*Adaptable Material Supply*), Mão-de-Obra versátil (*Versatile Workforce*), Uniformização de processos (*Increased Commonality*), Padronização de processos (*Standardised Work Content*), Coordenação entre as propriedades do produto e da linha (*Integrated Product Properties*) e Planeamento estratégico (*Strategic Planning*).

2.2.2 Aplicação do conceito de Reconfigurabilidade

Os esforços iniciais para desenvolver sistemas de montagem altamente flexíveis foram complementados pela introdução do conceito de sistemas de montagem reconfiguráveis - *Reconfigurable Assembly Systems*, [16, 35]. Esses projetos sublinham a necessidade de sistemas de montagem

colaborativos e autónomos para permitir mudanças rápidas e reduzir o tempo de implementação das mesmas [36]. Segundo [El Maraghy 2016] [11], sistemas deste tipo correspondem a um dos paradigmas mais promissores para o fornecimento de uma solução efetiva para gerir mudanças e incertezas em ambientes de produção complexos. Dois conceitos são aplicados para satisfazer este pressuposto: Flexibilidade e Modularidade [21]. A *iFactory*, localizada no Centro de Sistemas de Produção Inteligentes da Universidade de Windsor no Canadá, é um exemplo prático da aplicação dos conceitos de reconfigurabilidade em sistemas produtivos. Esta consiste em módulos que podem ser facilmente reconfigurados para realizar modificações em termos de *layout* e funcionalidades do sistema. A modularidade auxilia na realização de uma ampla gama de novas configurações do sistema a partir de sistemas de montagem existentes, que podem ser criados e expandidos pela adição, remoção e distribuição dos módulos do sistema [11].

Como referido no Capítulo 1, um sistema reconfigurável implica a execução regular de tarefas de *ramp-up*, calibração e inspeção. Enquanto por um lado, durante a execução de processos de reconfiguração, a calibração do sistema assume elevada importância, por outro lado, após a execução, a probabilidade de surgirem problemas de qualidade em resultado da reconfiguração é elevada, verificando-se de forma frequente [21]. Assim, e tendo em conta a vital importância de satisfazer estes pressupostos, torna-se necessário recorrer à utilização de dispositivos sofisticados capazes de suportar a execução adequada de cada uma das referidas tarefas [21]. Neste sentido, em [37] um sistema de calibração automático é proposto para promover a calibração eficaz de robôs de montagem. Mehrabi (2002) [18], por sua vez, desenvolvem um sistema de monitorização multi-sensor com o objetivo de aumentar a capacidade de diagnóstico do sistema. Por fim, em [21], o autor menciona o desenvolvimento de uma máquina de inspeção capaz de examinar peças de forma particularmente eficiente.

2.3 Automação em Sistemas de Produção

Na literatura é possível encontrar diversas abordagens, investigações e desenvolvimentos efetuados com o objetivo de melhorar a flexibilidade de sistemas de produção.

O termo automação é utilizado na literatura com vários significados. Em [38] a definição empregue refere-se a "substituição, total ou parcial, de uma função anteriormente realizada por um operador humano". Ao considerar a dualidade "total ou parcial", esta definição deixa claro que a automação não é uma questão de "tudo ou nada". De facto, a automação pode variar segundo uma série gradativa de níveis, onde o nível mais baixo corresponde ao desempenho totalmente manual do sistema e o nível mais alto à automação totalmente autónoma que dispensa todo e qualquer envolvimento humano. Deste modo, quanto mais alto o nível, maior a autonomia da parte automatizada do sistema [4–6, 38, 39].

Entre estes dois extremos vários níveis foram propostos, originando uma série de escalas e taxonomias [40].

2.3.1 Níveis de Automação - Level of Automation (LoA)

Em [38], o nível de automação é definido como uma progressão contínua entre operações manuais a totalmente automáticas. Esta parece ser a definição tradicional e mais abrangente do conceito. Apesar de globalmente aceite, o conceito vem sendo revisto e inovado. Em [5] é apresentada uma revisão extensa da literatura sobre as definições e taxonomias do conceito de "LoA" empregues em múltiplos domínios, científicos e industriais. O autor refere que, a partir da literatura relacionada, é possível notar que o conceito de "nível de automação" foi considerado por especialistas de diversas áreas, entre elas aviação, robótica e indústria de processos. Refere ainda, no entanto, que apesar da extensa literatura disponível, muito poucas estão relacionadas com a esfera de sistemas de produção. Neste sentido, após explorar o conceito, o autor sugere uma definição direcionada à aplicação neste domínio.

Segundo Frohm (2008) [5], do ponto de vista da produção, é frequente utilizar uma definição alinhada com a proposta de [41], onde o nível de automação é visto como uma relação entre o número de operadores e o número de máquinas presentes no chão de fábrica. Em [4], LoA é definido como "a relação entre humanos e tecnologia em termos de atribuição de tarefas e funções". A definição de Frohm evidencia o facto de que, além dos diferentes níveis, é também relevante considerar as diferentes funções que podem ser automatizadas. Sheridan e Verplank (1978) propuseram uma escala de níveis de automação envolvendo automação ao nível da tomada de decisão e ao nível da ação [39]. Em [38], os autores estendem o conceito anterior, de modo a incluir as etapas de coleta e análise de informação, definindo quatro classes de funções que descrevem a interação homem-máquina: aquisição de informações, análise de informações, seleção de decisões e implementação de ações. Para cada uma dessas funções, diferentes níveis de automação podem ser mais ou menos apropriados. Denker (2009) [36] resume as ideias anteriores ao afirmar que o conceito de nível de automação consiste num indicador de alocação de tarefas num sistema de produção, sendo expresso segundo um índice de tarefas físicas e cognitivas.

De facto, apesar da maioria dos processos de produção, a princípio, parecer envolver apenas automação de tarefas físicas, ao realizar uma análise mais profunda, é possível constatar a existência de um vasto número de tarefas cujo controlo é efetuado por máquinas, sendo também esta uma forma de automação. Neste sentido, o conceito de automação pode ser desagregado em duas classes básicas: Mecanização (*Mechanization*), que corresponde à substituição da força de trabalho manual, estando frequentemente associada à utilização de máquinas de produção individuais e robôs, e Informatização (*Computerization*), que é definida como a substituição de tarefas cognitivas, incluindo recolha, armazenamento, análise e uso de informação para controlar processos [4,5]. De forma resumida, a mecanização é aplicada no chão de fábrica, e a informatização no sistema de suporte e controlo [6].

Em concordância com as propostas de [Frohm (2005) [4] e [Frohm 2008] [5], a presente dissertação fará uso da definição de automação como conceito que une a mecanização e a informatização, conforme ilustrado na figura 2.6.

Em diversos estudos [4, 5, 7], os autores consideram que a maioria das tarefas de produção

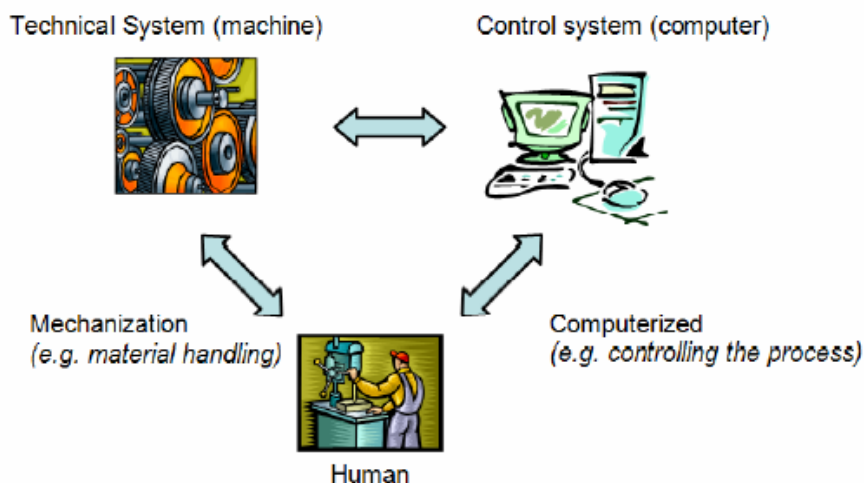


Figura 2.6: Separação de funções automatizáveis em mecanização e informatização (Fonte: [4])

envolvem uma mistura de mecanização e informatização. Embora, reconheça a importância das duas classes, dado o contexto da presente dissertação e tendo em conta que as taxonomias apropriadas para definição dos níveis de automação estão diretamente relacionadas com o tipo de classe, o foco será dado apenas à aplicação do conceito segundo a definição de mecanização de tarefas, ou seja, considerando apenas tarefas físicas e operacionais.

Em [5], após realizar uma revisão transversal e generalizada das taxonomias disponibilizadas na literatura, o autor seleciona aquelas que considera suscitar interesse no âmbito da produção, de forma a agrupá-las na sua proposta. Duas classificações são utilizadas como base. A primeira é referente à proposta de Duncheon (2002). Nesta abordagem o nível de automação, segundo a perspectiva de mecanização, é expresso em três níveis: "manual", onde as tarefas são realizadas sem qualquer suporte da automação ou tecnologias (aplicação de lubrificante no bloco de um motor, por exemplo); "semi-automático", que consiste na colaboração entre operadores humanos e suportes tecnológicos para realização da tarefa (aplicação de lubrificante com recurso a um braço robótico operado por um humano) e "automático", que exclui qualquer intervenção humana aquando da realização das tarefas. A segunda refere-se à abordagem proposta de Chiantella (1989) que, apesar de apresentar algumas semelhanças relativamente a proposta de Duncheon (2002), classifica o conceito de "mecanização" em quatro níveis: "Manual", cuja definição é análoga a considerada na proposta de Duncheon; "Máquina", onde um operador recebe assistência mecânica de uma ferramenta, como uma máquina de pregos ou uma prensa; "Programa Fixo", correspondendo à execução da operação por uma máquina de programa fixo; e "Controlo Programável", onde a execução da tarefa é, como no nível anterior, desempenhada por uma máquina, contudo, neste caso, apresenta a capacidade de realizar tarefas variadas. Ao considerar o conceito de "flexibilidade", esta abordagem mostra-se mais interessante que a anterior no âmbito da presente dissertação. Como referido anteriormente, a abordagem proposta por Frohm (2008) [5] procura conjugar diferentes taxonomias. Assim, esta é mais extensa e detalhada, correspondendo a uma divisão em 7 níveis.

Apesar de, como referido anteriormente, o foco apenas ser dado a uma das perspetivas, é relevante referir que uma das vantagens da abordagem proposta por Frohm em relação às outras disponíveis, é que tanto o nível de suporte físico como o cognitivo podem ser analisados e avaliados na mesma taxonomia [5]. A mesma é apresentada na figura 2.7.

| LoA | Mechanical and Equipment | Information and Control |
|-----|--|--|
| 1 | Totally manual - <i>Totally manual work, no tools are used, only the users own muscle power. E.g. The users own muscle power</i> | Totally manual - <i>The user creates his/her own understanding for the situation, and develops his/her course of action based on his/her earlier experience and knowledge. E.g. The users earlier experience and knowledge</i> |
| 2 | Static hand tool - <i>Manual work with support of static tool. E.g. Screwdriver</i> | Decision giving - <i>The user gets information on what to do, or proposal on how the task can be achieved. E.g. Work order</i> |
| 3 | Flexible hand tool - <i>Manual work with support of flexible tool. E.g. Adjustable spanner</i> | Teaching - <i>The user gets instruction on how the task can be achieved. E.g. Checklists, manuals</i> |
| 4 | Automated hand tool - <i>Manual work with support of automated tool. E.g. Hydraulic bolt driver</i> | Questioning - <i>The technology question the execution, if the execution deviate from what the technology consider being suitable. E.g. Verification before action</i> |
| 5 | Static machine/workstation - <i>Automatic work by machine that is designed for a specific task. E.g. Lathe</i> | Supervision - <i>The technology calls for the users' attention, and direct it to the present task. E.g. Alarms</i> |
| 6 | Flexible machine/workstation - <i>Automatic work by machine that can be reconfigured for different tasks. E.g. CNC-machine</i> | Intervene - <i>The technology takes over and corrects the action, if the executions deviate from what the technology consider being suitable. E.g. Thermostat</i> |
| 7 | Totally automatic - <i>Totally automatic work, the machine solve all deviations or problems that occur by it self. E.g. Autonomous systems</i> | Totally automatic - <i>All information and control is handled by the technology. The user is never involved. E.g. Autonomous systems</i> |

Figura 2.7: Escala de Níveis de Automação no âmbito de sistemas de produção (Fonte: [5])

Para utilizar de forma plena os potenciais fornecidos pela automação, a decisão relativa ao nível de automação a implementar deve ser refinada e abordada a um nível estratégico [6]. Assim, além de ter em consideração as possíveis vantagens de escolher entre diferentes níveis de automação, o projeto eficiente da automação de um sistema relaciona-se também com a otimização da interação homem-máquina orientada à situação específica [4]. Embora este conceito seja transversalmente aplicado em diversos contextos, o foco será dado à sua aplicação a nível operacional, ou seja, alocação e distribuição de tarefas entre subsistemas humanos e técnicos.

2.3.2 Alocação de Tarefas

Na grande maioria das instalações modernas de produção, verifica-se uma partilha muito próxima de tarefas entre homens e máquinas. A forma como essas tarefas são distribuídas é determinada pelo design do sistema, num processo chamado de alocação de funções ou tarefas [42]. Assim, este processo refere-se às decisões de projeto que determinam quais funções devem ser realizadas por seres humanos e quais devem ser realizadas por máquinas [43].

A alocação de tarefas entre humanos e máquinas é provavelmente a etapa mais importante no design de sistemas que promovam a utilização cooperativa destes recursos [42, 44, 45]. As contribuições iniciais neste campo foram feitas por [46], que introduziu o modelo clássico para alocações de tarefas. Tal modelo, conhecido como lista "MABA-MABA" (Men are Better At - Machines are Better AT) ou "Lista de Fitts", corresponde a uma lista generalizada de tarefas que ilustra em que situações específicas a performance de humanos excede a das máquinas e vice-versa [5]. Na

prática, esta lista vem sendo utilizada, principalmente, para racionalização de decisões de mecanização em decisões binárias, isto é, para determinar se uma tarefa deve ou não ser automatizada [6]. A lista proposta por Fitts é apresentada na Tabela 2.8.

| Men are better at | Machines are better at |
|--|--|
| Detecting small amounts of visual, auditory, or chemical energy | Responding quickly to control signals |
| Perceiving patterns of light or sound | Applying great force smoothly and precisely |
| Improvising and using flexible procedures | Storing information briefly, erasing it completely |
| Storing information for long periods of time and recalling appropriate parts | Reasoning deductively |
| Reasoning inductively | |
| Exercising judgment | |

Figura 2.8: Lista MABA-MABA (Fitts 1985) (Fonte: [6])

Winter (2014) [45] afirma que nenhum outro método de alocação desenvolvido posteriormente foi capaz de substituir a lista de Fitts em termos de simplicidade e clareza. Contudo, à medida que os computadores se tornam mais inteligentes, a distinção tende a ser cada vez menos evidente [6]. De facto, desde a sua introdução, uma série de críticas vêm surgindo neste sentido, contestando a sua aplicabilidade no âmbito de sistemas de engenharia [5, 6, 45]. As razões para tal são apontadas em diversas fontes na literatura [5, 45]. Em [5], o autor defende a ideia apresentada por Jordan (1963) [47], que dita que homens e máquinas não devem ser comparados nem consideradas entidades conflitantes como sugere a abordagem de Fitts, mas, em vez disso, devem ser consideradas complementares.

Tendo em conta as ideias apresentadas, torna-se possível concluir que tornar um sistema de produção o mais robusto e flexível possível não é só uma questão de como atribuir tarefas e funções aos elementos certos do sistema, mas também uma questão de como humanos e máquinas podem apoiar-se um ao outro ao longo de diferentes níveis de automação [4, 5, 36].

2.3.2.1 Estratégias para alocação de tarefas

Diversas estratégias aplicadas à atribuição de funções ou tarefas entre automação/tecnologia e humanos (ou seja, nível de automação) já foram propostas [43]. As estratégias tradicionais foram introduzidas por Rouse (1991), que sugere uma classificação em três tipos [4, 6, 43]: comparativa, "sobra" e económica. A alocação comparativa é bem descrita pela lista MABA-MABA, referida anteriormente. A alocação por "sobra" assenta no princípio de que humanos devem ser alocados a tarefas onde nenhuma solução técnica pode ser aplicada. Por fim, na alocação económica, o critério utilizado é o custo, ou seja, se o custo relacionado com a automatização da tarefa for superior ao custo de contratação de um operador, a função não será automatizada, mesmo que haja soluções técnicas disponíveis para o efeito. Uma vez realizada a alocação, a responsabilidade permanece afeta ao agente de forma definitiva e estática.

Estratégias mais recentes para a concepção de sistemas semi-automáticos enfatizam a utilização de abordagens baseadas em cenários dinâmicos e adaptativos [43]. A estratégia passa por proporcionar ao humano oportunidades para alocar e reatribuir tarefas dinamicamente, conforme as necessidades do sistema. Esta é uma estratégia fortemente emergente no âmbito da indústria automível [6].

2.3.3 Automação Adaptativa

Uma abordagem alternativa que tenta beneficiar das vantagens da automação, ao mesmo tempo em que minimiza custos, passa por variar a alocação de função no decorrer das operações do sistema [39]. Esta abordagem é definida como "Automação Adaptativa"(AA) ou "Alocação Dinâmica de Funções"(DFA). Segundo [40], esta é uma abordagem complementar à utilizada no conceito de Níveis de Automação. A diferença assenta apenas no fato de envolver alocações de controlo dinâmicas e a LoA envolver apenas atribuições de função estáticas.

De acordo com [39] existem duas maneiras pelas quais o AA pode favorecer e melhorar o desempenho da parte humana do sistema. Por um lado, pode ser utilizado para fornecer uma ajuda automatizada para reduzir a carga de trabalho quando os operadores estão sobrecarregados (overloaded). Por outro lado, em condições de baixa carga de trabalho, uma tarefa previamente automatizada poderia ser retornada brevemente ao operador para reduzir a complacência e manter a habilidade manual.

Safsten (2007) [6] desenvolve um artigo que enfoca os aspetos relacionados com o gerenciamento de níveis dinâmicos de automação principalmente a nível estratégico. A pesquisa apresentada neste trabalho foi realizada como parte de um projeto de pesquisa sueco, DYNAMO - *Níveis dinâmicos de automação*. O projeto DYNAMO apresenta o conceito de variação dinâmica do nível de automação como forma de alcançar sistemas robustos de produção [4]. Este projeto, que terminou em 2007, foi iniciado para atender às necessidades industriais de soluções adaptativas e mudanças dinâmicas nos níveis de automação de sistemas de produção ao longo das diferentes fases do ciclo de vida do sistema. O objetivo era fornecer à indústria uma metodologia que possibilitasse medir, visualizar e gerenciar níveis dinâmicos de automação [4, 5]. Segundo [48], a metodologia desenvolvida no âmbito deste projeto é uma forma eficaz de ajudar as empresas no processo de seleção do nível "correto" de automação, acarretando grandes benefícios em termos de tempo e economia de custos nas fases de planeamento e implementação. Ao variar o LoA de forma controlável, torna-se possível lidar com variações planeadas e não planeadas. Uma vez que um sistema de produção robusto depende da flexibilidade para lidar com variações no processo (por exemplo, introdução de novos produtos, mudanças de ferramentas, distúrbios do produto, etc.), a aplicação desta metodologia mostra-se uma estratégia promissora [4].

O projeto ProAct aplica a metodologia DYNAMO, numa versão ampliada, como uma das suas etapas [36, 48]. O resultado da medição realizada com recurso à metodologia é uma matriz cuja área representa as soluções técnicas possíveis para tarefas de montagem, mecânicas e cognitivas, segundo os níveis de automação adequados. A referida matriz é ilustrada na Figura 2.9.

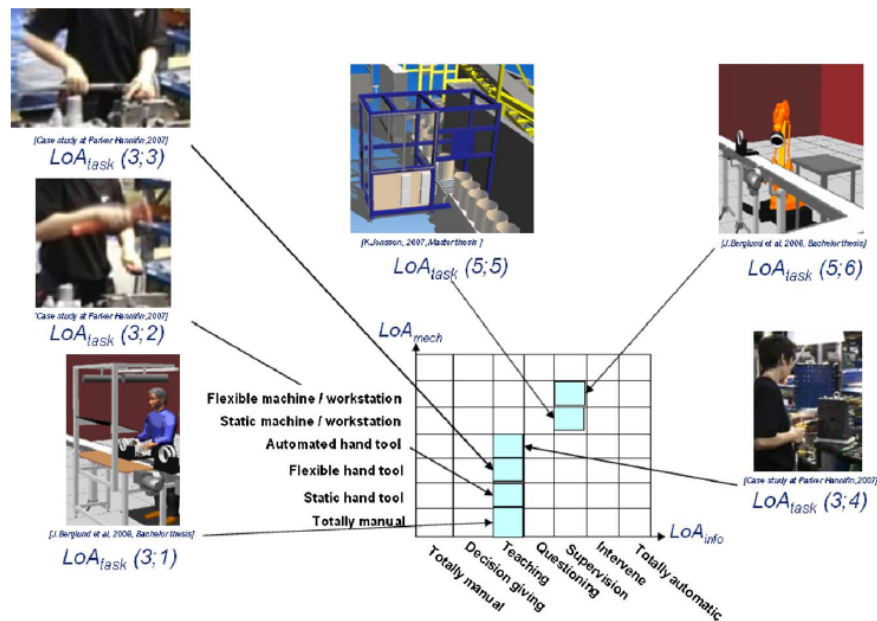


Figura 2.9: Exemplo de resultado da aplicação da metodologia DYNAMO (Fonte: [7])

2.4 Homem e Máquina em Sistemas de Montagem

Recorrer à automação é uma estratégia frequentemente utilizada para promover o aumento da produtividade e eficiência em sistemas de produção e montagem. No entanto, apesar do tremendo desenvolvimento verificado nesta área, ainda não há evidências de que o trabalho manual tenha sido superado como recurso flexível nos sistemas de montagem [36].

Os novos desenvolvimentos tecnológicos têm um grande impacto sobre o papel do ser humano na produção. Note-se que o processo produtivo é um esforço combinado entre homens e máquinas, que interagem de maneira a alcançar o objetivo final, que é um produto. A este respeito, há duas visões contrastantes que refletem os dois extremos da automação industrial: a primeira considera o homem como a fonte de erros e, portanto, defende a automação integral dos processos; A opinião contrária considera o homem como a fonte de recuperação de erros, mantendo a ideia de que há sempre papéis onde o ser humano é tido como uma ferramenta vantajosa e essencial do sistema [16].

Segundo [36], pesquisas e desenvolvimentos recentes na área que envolve o conceito de montagem são fortemente caracterizados por abordagens centradas na aplicação de elevados níveis de automação, cujo princípio passa por "Automatizar tudo aquilo que pode ser automatizado". Esta estratégia designa-se Automação centrada na Tecnologia - *Technological-centered Automation*. Em resposta a esta abordagem, a automação centrada no ser humano tem sido sugerida [36]. Em [40], o autor refere que este tipo de automação apresenta muitos significados alternativos que vão desde "alocar ao humano as tarefas mais adequadas ao humano, alocar à automação as tarefas mais adequadas à automação", até "alcançar a melhor combinação de controlo humano e automá-

tico, onde "melhor" é definido por objetivos explícitos do sistema". Segundo o autor, o objetivo da automação centrada no ser humano é criar sistemas que mantenham o operador humano com tarefas significativas e bem planeadas, tornando-os capazes de desempenhar as suas tarefas de forma satisfatória e, assim, otimizar o funcionamento global do sistema. [36] afirma que a presença humana, geralmente, tem muito poucas consequências negativas em termos de performance e qualidade do sistema, e raramente é possível atender às exigências de mercado em termos de flexibilidade e eficiência económica apenas pela utilização da automação.

Por um lado, os seres humanos são naturalmente propensos a possuir elevada flexibilidade e agilidade para lidar com mudanças e incertezas. Por outro lado, operações de montagem podem aumentar significativamente os níveis de flexibilidade e reconfigurabilidade do sistema. Assim, torna-se evidente concluir que aliar estes dois fatores é uma estratégia extremamente vantajosa para alcançar a otimização da performance do sistema.

2.4.1 Cooperação Homem-Máquina

Um dos obstáculos para adotar um RAS é a versatilidade e flexibilidade do ser humano em comparação com máquinas automáticas em processos de montagem tradicionais. Apesar da tendência em introduzir automação no sistema, o desenvolvimento de um RAS não implica eliminar completamente o homem do sistema de montagem. Em vez disso, o sistema deve ser projetado de modo que os operadores humanos sejam capazes de realizar de forma eficiente as tarefas que não podem ser automatizados e vice-versa [21].

Tipicamente, um sistema automático promove uma série de vantagens relativamente a sistemas operados por humanos, tais como operações sem fadiga ou intervalos e elevada taxa de produtividade. Em contrapartida, apesar de possuírem habilidades apuradas para realizar as tarefas a que foram destinados, verifica-se uma limitação no sentido de desempenhar tarefas diferentes ou mais complexas, estando muitas vezes dependentes de elevados esforços de programação, o que afeta de forma significativa a flexibilidade da linha. Os operadores humanos, por sua vez, são capazes de fornecer habilidades sensoriais e motoras incomparavelmente superiores na realização de tarefas complexas e podem rapidamente adaptar-se a novas sequências de produção, sendo no entanto, mais limitadas em termos de força e precisão. Visto isto, torna-se possível concluir que a conjugação devida destes dois extremos é essencial para alcançar a máxima flexibilidade. Os requisitos de projeto deste tipo de sistemas foram discutidos por Heilala e Voho (2001).

Em [34], o autor propõe e avalia duas possíveis abordagens para a configuração de sistemas que combinam etapas de montagem automáticas e manuais de modo a otimizar a eficiência do sistema. Os sistemas propostos diferem, essencialmente, no posicionamento das estações que dispõem das operações manuais: O primeiro pressupõe que estas estejam posicionadas em paralelo e o segundo que estejam organizadas sequencialmente. Para medir a performance dos modelos, compará-las e, por fim, efetuar a seleção do mais vantajoso, Lien desenvolve um modelo teórico que considera, entre outros parâmetros, efeitos e curvas de aprendizagem, volume de produção, número de operações efetuadas e número de variantes do produto. Após aplicação deste modelo,

Lien conclui e evidencia que a configuração paralela apresenta maior potencial em termos de melhoramento da eficiência do sistema na medida em que, além de ser mais facilmente configurado, apresenta menos perdas dependentes do sistema. Em concordância com as ideias introduzidas por [34], [10] afirma que a melhor maneira de conjugar as características e capacidades robóticas e humanas é obtida quando as tarefas simples e generalistas são atribuídas a robôs e posicionadas a montante da linha e, as tarefas mais complexas e variáveis, que conferem ao produto as suas características individuais e customizadas, são atribuídas a operadores humanos e posicionadas a jusante da linha. Kuber (2016) [9], desenvolve um método para identificar o modo como linhas de montagem existentes e implementadas podem ser reconfiguradas para comportar mudanças nos requisitos de produção. O autor segue abordagens já existentes baseadas nos paradigmas de modularização de sistemas e sistemas reconfiguráveis. A investigação aplica o conceito de "graus de liberdade", focando-se em investigar e explorar as possibilidades de mudança da ordem dos elementos da linha.

2.4.1.1 Tipos de Cooperação

Como referido anteriormente, a implementação dos conceitos de flexibilidade e a capacidade de responder a mudanças requer cooperação direta entre homens e máquinas. Essa interação é essencial e tem uma implicação direta no aumento da eficiência do sistema. Diferentes tipos de cooperação e interação entre humanos e robôs podem ser aplicados. Kruger (2009) propõe uma divisão dos sistemas híbridos em dois grupos: "Workplace sharing systems" e "Time sharing systems". No primeiro caso, a cooperação entre robôs e humanos está limitada à partilha do espaço de trabalho e, por isso, não se verifica a execução de tarefas em simultâneo. A interação é limitada ao mecanismo de "collision avoidance", onde as ações do robô são interrompidas quando a distância entre ele e um ser-humano é inferior à distância de segurança estipulada. Um exemplo de implementação deste sistema é o sistema team@work da Fraunhofer e IPK [8]. Por sua vez, no segundo caso, verifica-se a possibilidade de operadores humanos e robôs operarem em simultâneo, havendo, além da partilha da estação de trabalho, partilha de tempo. Neste cenário, a interação entre o robô e o humano não pode ser limitada ao mecanismo de "collision avoidance", sendo necessário um mecanismo mais sofisticado. O projeto PISA [49] é um exemplo onde a flexibilidade do sistema de montagem é alcançada através da cooperação homem-máquina num sistema do tipo "workplace and time sharing". O foco é conferido a sistemas inteligentes de assistência inovadores e ferramentas de planeamento para a sua integração no sistema, passando ainda pela exploração dos conceitos de reconfigurabilidade e reutilização de equipamentos de montagem. Segundo Kruger, o principal objetivo do projeto é manter os operadores humanos no sistema de produção, mas auxiliá-los com poderosas ferramentas para aumentar o seu desempenho.

Segundo Schraft (2005), quatro tipos de cooperação entre homens e robôs podem ser definidos: O primeiro tipo de cooperação é definido como "operação independente". Neste caso, humanos e robôs operam de forma independente em diferentes peças de trabalho. O segundo tipo consiste na "cooperação sincronizada", onde trabalhadores e robôs, ainda separados, operam consecutivamente em uma peça de trabalho. O terceiro tipo corresponde à operação em uma peça de trabalho

compartilhada, porém sem contato físico. O último nível corresponde à cooperação direta a partir da interação física entre operador e robô. A figura 2.10 ilustra a referida classificação.

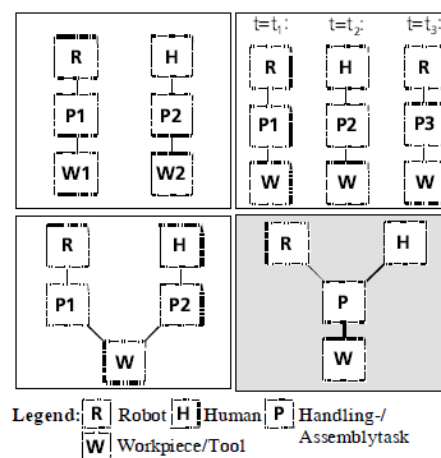


Figura 2.10: Diferentes tipos de Cooperação entre humanos e robôs (Fonte: [8])

O projeto ROBO-PARTNER [50] promove uma solução híbrida que envolve os diferentes tipos de cooperação, sugerindo, no entanto, uma classificação em 3 níveis. O primeiro nível envolve a execução de tarefas diferentes por homens e robôs, enquanto partilham o mesmo espaço de trabalho. Neste caso, não são necessárias barreiras ou outros sistemas físicos de segurança uma vez que, através da utilização de uma série de sensores (força, visão, presença), o robô é capaz de se manter sempre ciente da presença humana. No segundo nível, a cooperação é realizada principalmente a nível cognitivo, onde o robô é utilizado para fornecer ao operador as peças de montagem corretas, reduzindo assim o tempo necessário para identificá-las ou ir buscá-las a áreas distantes da zona de produção. O último nível de cooperação corresponde à execução da mesma tarefa de montagem pelo robô e pelo ser humano, verificando-se interação física direta. Esta abordagem permite a combinação de habilidades humanas, tais como percepção e destreza, com características vantajosas dos robôs como robustez, força, precisão e repetibilidade de modo a que a mesma tarefa seja executada da forma mais eficiente possível.

2.4.2 Tecnologias de Automação em sistemas Cooperativos

A colaboração de homens e máquinas em cenários de automação híbrida segue dois objetivos: Redução dos custos unitários e aumento da flexibilidade de produção [7].

Em relação ao primeiro objetivo, a prática industrial moderna, cada vez mais, direciona-se à substituição do homem por robôs. Uma preocupação clara e transversal a grande parte das indústrias de produção relaciona-se com a questão de como competir com países de baixo custo. Uma das respostas foi que o sistema deve ampliar o uso de recursos tecnológicos, ou seja, automação [4]. Segundo Laperrière (2014) [7], em 2013, o custo de um robô correspondia, aproximadamente, a um valor de uma a duas vezes o custo salarial anual de um trabalhador industrial qualificado na maioria dos países da Europa Ocidental, EUA, Canadá e Japão, significando isto,

que o tempo de recuperação do investimento de um robô que substitui um operador humano é consideravelmente curto. Após este período, o robô é tido como um "operador de muito baixo custo" que permite às indústrias localizadas em países de elevado custo salarial competir de forma mais uniforme com indústrias em países de baixo custo [7]. Atualmente, áreas típicas de aplicação de robôs na indústria correspondem a linhas de montagem de automóveis, em operações de soldadura, pintura, manipulação de peças, entre outras; a indústria siderúrgica, em operações de manipulação de peças na formação de chapas, operações de fundição e moldagem por injeção; a indústria eletrônica em montagens de sub-conjuntos de pequeno e médio porte; Além de operações de embalamentos e paletização, em todos os tipos de indústria. Apesar de não ser muito exaustiva, esta lista pode ser estendida a todas as tarefas de produção manual que possa ser descrita como um conjunto de movimentos físicos bem definidos e não excessivamente complexos [7].

Uma série de outros argumentos são utilizados para promover e suportar a utilização de robôs, entre eles: Melhorias de qualidade, já que os robôs executam as operações com menos variância e com mais consistência que os humanos; Redução do tempo de produção, uma vez que, tradicionalmente, a introdução da automação com uso de robôs é utilizada de forma a unir as operações e originar maiores taxas de fluxo de material nas linhas; Automação flexível, os robôs industriais são intrinsecamente flexíveis. A sua utilização permite a criação de sistemas potencialmente flexíveis, através da seleção de bibliotecas de tarefas pré-programadas e reconfiguráveis, e da realização de mudanças físicas no equipamento de suporte [7].

Em contrapartida, à medida que as tendências de produção se deslocam para uma maior diversificação de produtos, os sistemas de produção apresentam novos, e cada vez mais exigentes, requisitos em termos de reconfigurabilidade. Apesar de a crescente flexibilidade operacional dos robôs para manipular e montar diferentes partes poder vir a ser, também neste caso, um motor para sua adoção, o nível de flexibilidade resultante do sistema continua a ser limitado. Tal fato deve-se, principalmente, aos seguintes fatores: O primeiro relaciona-se com o facto de os robôs exigirem um posicionamento no chão de fábrica que garanta o fornecimento adequado de consumíveis (ar, eletricidade, água, etc). Tal restrição limita a possibilidade de mudanças físicas na configuração do sistema de montagem. A segunda desvantagem está na complexidade de integração de controlos e programação de novos recursos e operações. As arquiteturas de controle existentes utilizam o métodos de controlo hierárquico (geralmente baseado no Controle Lógico Programável - PLC), que requerem esforços, tempo e experiência quando se trata de integrar novos equipamentos [51]. Ou seja, apesar dos esforços e inúmeras tentativas de criar máquinas que imitam ações e comportamentos humanos para satisfazer necessidades, os operadores humanos continuam a ser um recurso praticamente insubstituível.

Assim, pode-se concluir que, enquanto por um lado, o primeiro objetivo favorece a utilização de automação e, por outro lado, o segundo torna indispensável a utilização de seres humanos, aliar os dois conceitos parece ser a solução ideal. Em [10], o autor enfatiza as vantagens adquiridas ao utilizar robôs como auxiliares poderosos e inteligentes do homem na realização de tarefas. Uma nova geração de sistemas ergonômicos de assistência, referidos como "*intelligent assist systems*" ou "*intelligent assist devices*" (IAD's), robôs colaborativos e manipuladores holónicos são

exemplos de sistemas avançados desenvolvidos no sentido de combinar os benefícios da flexibilidade, inteligência e capacidades humanas com as vantagens conferidas por sistemas robóticos, principalmente no que toca a possibilitar ultrapassar limites impostos pelas condições físicas dos humanos [11].

2.4.2.1 Robôs Cooperativos

O uso de robôs cooperativos é o principal facilitador na busca por obtenção e aplicação de reconfiguração ao nível dos recursos [Makris 2012]. Exemplos industriais de aplicação deste tipo de robôs podem ser encontrados, atualmente, em processos de montagem de caminhões pesados e de diferentes modelos de táxis com diferentes tipos de teto solar [17]. Outro exemplo, corresponde à utilização de dois robôs cooperativos na operação de montagem do módulo do para-choques dianteiro de um carro familiar [18] [52].

• Robôs Industriais

Os robôs industriais são amplamente utilizados no processo de automação de sistemas de montagem. Além de possuírem as características intrínsecas dos robôs, como elevada precisão, consistência e repetibilidade, velocidade e força, a possibilidade de serem reprogramados para realizar diferentes operações, possibilitaram a que sua utilização encontrasse uma excelente, e muito promissora, aplicação no âmbito dos sistemas RAS [21, 24, 37].

• Robôs de Assistência

Helmes et al. define um robô de assistência como um dispositivo flexível de interação direta que fornece assistência baseada em sensores, atuadores e processamento de dados. O robô rob@work, desenvolvido pelo Instituto IPA da Fraunhofer é um exemplo de robô de assistência [10].

• Robôs de Assistência - COBOTS

A tendência atual pela interação direta entre robôs e humanos levou ao desenvolvimento de um novo tipo de sistemas robóticos, chamados robôs de assistência. O principal objetivo deste tipo de robôs corresponde ao fornecimento de suporte a estações de trabalho manuais, que são até hoje considerados os sistemas de trabalho mais flexíveis [8].

Os COBOTS, introduzidos por Edward Colgate [53] são exemplos de robôs de assistência. Estes correspondem a dispositivos mecânicos que fornecem orientação através do uso de servomotores, enquanto um operador humano fornece força motriz. Por exemplo, perante a necessidade de manipulação de peças de grandes dimensões, estes robôs são capazes de atuar auxiliando o operário no emprego de força, o que possibilita uma redução significativa na tensão física do trabalhador [10].

A utilização de robôs que atuam no auxílio de tarefas executadas por humanos pode ser vista em diversos tipos de ambiente [10]. As vantagens associadas têm motivado o desenvolvimento de novas tecnologias para aprimorar o seu desempenho e ampliar os seus benefícios, levando ao surgimento de abordagens alternativas. [10] refere a utilização de exoesqueletos para suporte de tarefas de manuseamento que envolvem cargas pesadas como um exemplo de abordagem alternativa

promissora. O autor afirma que, em comparação com sistemas robóticos colaborativos, sistemas de exoesqueleto fornecem uma maior mobilidade, sendo esta uma vantagem.

O Projeto PowerMate [8] visa fornecer uma contribuição na área da robótica colaborativa, ao apresentar um robô de assistência para tarefas de manipulação e montagem. A principal ênfase do projeto foi desenvolver um robô que fosse capaz de trabalhar em conjunto com um trabalhador humano e que esteja em conformidade com a categoria de segurança 3 de acordo com a norma DIN ISO 954.

• Sistemas robóticos Humanóides/Antropomórficos

Os robôs antropomórficos, também conhecidos como robôs articulados, correspondem à classe dominante de robôs industriais. É, também, a classe de robôs que melhor consegue reproduzir o comportamento humano, e que, portanto, oferece o maior nível de destreza. A sua estrutura cinemática aproxima-se da estrutura do braço humano. O braço e o pulso consistem numa cadeia de ligações em série com juntas rotacionais. Apesar de estas características implicarem um grau mais complexo de controlo, os microcontroladores de grande capacidade disponíveis atualmente reduziram este desafio para um nível gerenciável [7].

O centro aeroespacial alemão, Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR), realizou uma investigação direcionada ao desenvolvimento de robôs humanóides. O objetivo passava por conceber robôs capazes de executar tarefas consideradas difíceis de serem desempenhadas de forma adequada por robôs industriais tradicionais. Entre elas, operações de montagem para as quais a estimação do posicionamento de peças e/ou a precisão de posicionamento do robô se encontra significativamente abaixo dos níveis da tolerância de montagem ou são afetadas por um elevado grau de incerteza ou aplicações onde o robô opera numa vizinhança muito próxima de seres humanos ou em cooperação física direta com eles.

• Robôs móveis

Um paradigma promissor associado ao uso de tecnologias como catalisadora da otimização da reconfigurabilidade de sistemas de produção, corresponde ao desenvolvimento de unidades robotizadas móveis capazes de assumir a realização de operações em cooperação com robôs já instalados na linha de montagem [52]. Este tipo de robôs possui a vantajosa característica de não restringir o seu espaço de trabalho ao local onde efetivamente opera, podendo este, portanto, ser variável dentro do ambiente de produção. [10] refere que esta inovação aumenta a flexibilidade e adaptabilidade do sistema, acarretando uma série de vantagens para processos de fabrico e montagem. Segundo [52], estes são considerados flexíveis na medida em que podem realizar diferentes operações e considerados reconfiguráveis já que possuem a capacidade de mudar de posição no chão de fábrica, proporcionando diferentes possibilidades de fluxos de produção e configurações da linha. Uma vez que também possibilita a execução de tarefas em paralelo por homens e máquinas, acaba por promover o aumento da eficiência, redução de custos e melhoria das características ergonómicas do sistema [10].

Alguns exemplos recentes de implementação de robôs em sistemas de produção para promover o aumento da flexibilidade correspondem à utilização da célula robótica "mobicell" da BMW e à utilização de robôs redundantes da PSA. Com base no conceito "mobicell", a célula robótica pode

ser deslocada entre diferentes plantas e colocada em produção em um novo local dentro de 2-3 dias. Por outro lado, a fábrica do modelo 307 da PSA incorpora robôs redundantes que podem assumir automaticamente tarefas de robôs principais que apresentem falhas ou avarias [52]. Brecher et al. desenvolveu e implementou um sistema robótico portátil no âmbito do projeto PORTHOS, a fim de melhorar a flexibilidade dos robôs industriais em tarefas de manuseamento de materiais.

[52] propõe uma abordagem para controle de robôs móveis autônomos em sistemas de produção. O conceito integra o controle em dois níveis: A nível da linha, ao proporcionar um controle de arquitetura orientado para o serviço capaz de lidar com as atribuições de operações entre recursos móveis e estáticos, além de permitir a comunicação autônoma entre recursos de modo a possibilitar tomadas de decisão em relação a ações de adaptação. E ao nível da unidade, cuja lógica permite a operação autônoma de recursos, integrando informações de sensores com componentes mecânicas e eletrônicas.

[50] investiga o efeito da introdução de robôs móveis flexíveis sistemas de montagem através de técnicas de simulação de eventos discretos aplicadas a um caso de estudo da indústria automóvel. Após comparar os resultados obtidos com o paradigma convencional, o autor conclui que aumentos significativos nos volumes de produção e na taxa de utilização de recursos podem ser alcançados.

2.4.3 Avaliação da performance

Tendo em conta os frequentes e inovadores avanços tecnológicos verificados atualmente, a implementação de robôs em várias aplicações industriais é, cada vez mais, considerada uma estratégia promissora e vantajosa. Tal fato leva a que a substituição de operadores humanos por robôs seja frequente. Uma vez que humanos e robôs diferem consideravelmente em temas de habilidades e limitações para desempenhar uma tarefa de forma produtiva, ter conhecimento dessas diferenças é um requisito fundamental aquando da conceção de sistemas que pretendam alcançar a utilização adequada e eficiente de tais recursos

Assim, existe a necessidade de desenvolver métodos e técnicas de medição capazes de quantificar e avaliar diferenças em termos de performance de robôs e homens. Tais técnicas representam uma ferramenta útil para realizar uma série de análises, como a viabilidade económica da decisão da alocação de uma determinada tarefa a um determinado recurso.

2.4.3.1 Revisão das técnicas de medição

Em [54] quatro técnicas utilizadas na medição da performance de humanos e robôs são apresentadas, analisadas e avaliadas.

As técnicas RTM (*Robot Time Motion*) e ROBOT MOST baseiam-se no conceito de Sistemas de Tempo de Movimento Pré-determinado (PMTS), que pressupõe dois princípios fundamentais: existe um valor de tempo universal preciso que pode ser atribuído a cada movimento básico; A soma dos valores dos tempos individuais dos movimentos básicos é igual ao tempo do movimento

completo. Ambas as técnicas consistem na decomposição das operações numa sequência de movimentos básicos previamente categorizados. A cada uma das categorias são atribuídos valores de tempo que depois são somados para calcular o tempo padrão de realização de toda a operação. Embora possuam a vantagem de serem generalizáveis, estas técnicas apresentam limitações e acarretam esforços. Além de requererem uma análise detalhada das características dos robôs, não têm em consideração medidas estocásticas como o desvio padrão na performance dos seres humanos [54].

O método designado “Estudo do tempo” estima valores de tempo através da medição direta da realização das operações por humanos e por robôs e posterior comparação. Embora esta técnica possua a desvantagem de não ser generalizável, ou seja, ter de ser realizada individualmente para cada operação, esta fornece uma medida isenta das limitações assentes nas técnicas anteriores, como por exemplo o facto de não ter em conta os valores do desvio padrão [54].

Ao descrever as técnicas, torna-se possível constatar que a avaliação da performance se relaciona de forma direta com a medição de tempos.

2.5 Conclusões

Quando se pretende o aumento da produtividade de sistemas de produção, a estratégia mais comum passa por apostar em tecnologias de automação. No mundo da automação industrial, o conceito de flexibilidade cada vez mais é tido como essencial. Devido às frequentes mudanças nos modelos de produtos que se tem verificado, dispor de elevada flexibilidade é indispensável tanto em sistemas manuais como em sistemas automáticos [3].

Os esforços iniciais para desenvolver sistemas de montagem altamente flexíveis foram complementados pela introdução do conceito de sistemas de montagem reconfiguráveis - *Reconfigurable Assembly Systems*, [16, 35]. Esses projetos sublinham a necessidade de sistemas de montagem colaborativos e autónomos para permitir mudanças rápidas e reduzir o tempo de implementação das mesmas [36]. Dois conceitos são aplicados para satisfazer este pressuposto: Flexibilidade e Modularidade [21].

Além disso, para tornar o sistema de produção tão robusto e flexível quanto possível, é essencial garantir a atribuição de tarefas e funções apropriadas aos elementos certos do sistema [4].

Capítulo 3

Abordagem Proposta

3.1 Introdução

A instalação de uma linha de montagem é um processo complexo que provoca repercussões a longo prazo, já que requer a aplicação de esforços a vários níveis e investimentos significativos de capital. Assim, é imperativo para qualquer organização que tal sistema seja concebido e equilibrado de modo a funcionar da forma mais eficaz possível [1].

Motivado pelo esforço despendido no ajuste do nível de automação das linhas de produção a variações na procura e mudanças nos produtos, o objetivo do presente trabalho é propor uma abordagem metodológica que seja capaz de auxiliar, e promover, o aumento dos níveis de flexibilidade e adaptabilidade de sistemas de montagem implementados, por meio da cooperação entre agentes.

No presente trabalho, o termo "agente" é utilizado no sentido geral para definir uma entidade decisional e denota, por exemplo, um operador humano ou uma máquina (robô).

3.2 Descrição do Problema

No que toca a requisitos de otimização de performance, é possível identificar uma série de problemas que têm um elevado peso no desempenho das organizações e que são passíveis de serem analisados e desenvolvidos de forma a serem solucionados.

Realizar atualizações nas linhas de produção é um processo crítico que acarreta custos. Frequentemente, verifica-se a necessidade de interromper a linha, acarretando também perda de produtividade. Especialmente em casos onde existem operações realizadas por robôs, este é um processo lento e extremamente complexo. Para contornar este problema, duas soluções são tradicionalmente implementadas: A primeira, designada "*Under Automation*", consiste em manter o nível de automação deliberadamente baixo, de forma a garantir uma elevada rapidez quando é necessário realizar uma atualização ou adaptação do sistema. A segunda, por sua vez, reproduz uma ideia precisamente oposta, sendo designada "*Over Automation*". Esta pressupõe que a conceção da linha seja efetuada de modo a introduzir automação integral no sistema. Consequentemente, implica um investimento inicial elevado e baixa utilização de equipamentos durante longos

períodos do ciclo de produção, além de acarretar dificuldades em termos de adaptabilidade e, principalmente, flexibilidade. Ambas as soluções revelam-se ineficientes e suscitam oportunidades de melhoria.

3.3 Metodologia Proposta

Como anteriormente referido, o design de um sistema de montagem reconfigurável é baseado em requisitos de sistema específicos e bem definidos. Assim, a primeira tarefa do processo de concepção de um RAS deverá corresponder a uma cuidada determinação dos requisitos do sistema.

Para sistemas de montagem em geral, as etapas e processos de montagem necessários são um requisito básico essencial. Para sistemas de montagem reconfiguráveis, em particular, dado o seu propósito, a capacidade de resposta a mudanças e incertezas, previsíveis e imprevisíveis, é um requisito igualmente essencial. A metodologia proposta basear-se-á, fundamentalmente, em promover a satisfação deste requisito de forma adequada e eficiente.

Sabendo que as definições de sistema de montagem flexível giram, principalmente, em torno do nível de automação do sistema e da sua capacidade para processar diferentes misturas e variantes de produtos [22], o foco será otimizar a estruturação da linha segundo o tipo de mão de obra alocada a cada uma das operações e o nível de automação empregue.

Como resultado final pretende-se a obtenção de um procedimento decomposto num conjunto de passos simplificados e objetivos que, ao serem concretizados, resultem na melhor maneira de alocar homens e máquinas, otimizando a flexibilidade do sistema e possibilitando futuras reduções de custos. Para tal, procedeu-se ao desenvolvimento de uma ferramenta qualificada que auxilia o processo de tomada decisão relativo ao nível de automação a implementar no sistema.

O esquema seguinte resume, de forma ilustrativa, a abordagem proposta.

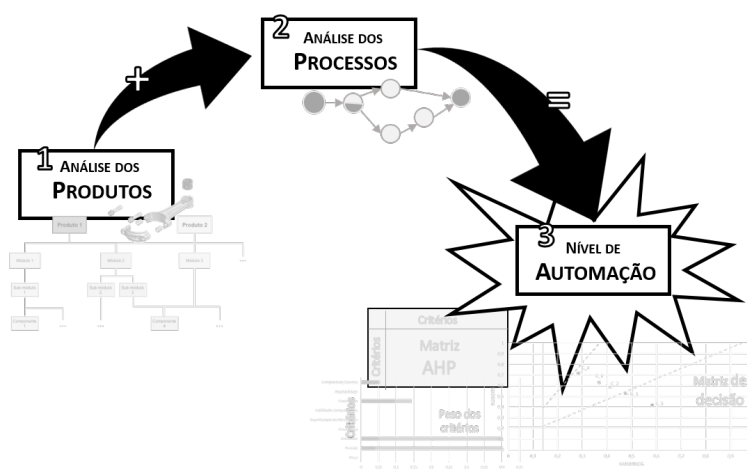


Figura 3.1: Esquema gráfico da abordagem metodológica

3.3.1 Passo 1: Análise do produto

Background

A maioria das decisões tomadas na fase de concepção do produto são determinantes e propagam-se por todo o seu ciclo de vida. De fato, mudanças introduzidas posteriormente a esta fase têm um impacto direto sobre a configuração do sistema de montagem existente e, por isso, frequentemente, acarretam elevados custos de produção [55].

Ao examinar as atividades de projeto envolvidas no ciclo de vida de um produto, a adaptabilidade do sistema em relação a mudanças pode ser alcançada, essencialmente, através de duas abordagens [21]:

1. Modularizar os produtos, de modo a torná-los tão semelhantes quanto possível e possibilitar a realização das operações a partir dos mesmos processos e utilizando os mesmos recursos.
2. Empregar sistemas reconfiguráveis que sejam capazes de acomodar diversas variações de processos, de modo que os produtos com processos diferentes possam ser manipulados no mesmo sistema.

A presente dissertação foca-se na aplicação e otimização da segunda abordagem mencionada.

Procedimento

A primeira etapa da metodologia corresponde ao estudo do produto.

O procedimento a realizar corresponde a identificar, de forma bem estruturada, as variantes de produtos que são operadas na linha. Para tal, sugere-se a utilização de um método de análise hierárquica [56,57]. A representação deverá indicar a decomposição de cada um dos produtos em módulos, sub-módulos e componentes, de modo a evidenciar as suas diferenças e, principalmente, as suas semelhanças, conforme ilustrado na Figura 3.2.

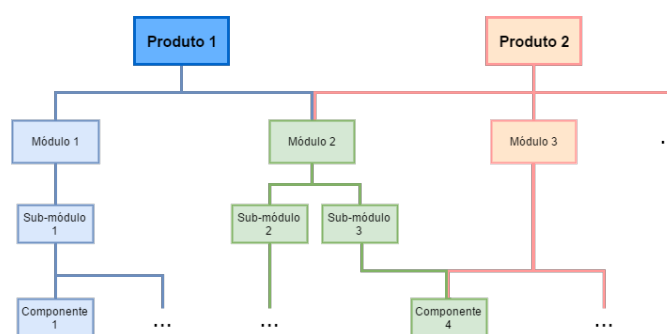


Figura 3.2: Diagrama hierárquico para representação de produtos

A representação eficaz das componentes de montagem e das relações hierárquicas entre elas pode ser bastante útil durante o planeamento conceptual do sistema e elaboração das sequências de montagem. As relações de dependência evidenciam operações de montagem comuns, que podem ser agrupadas na linha de modo a que esta seja concebida de forma quase independente

das variantes. Assim, sempre que uma mudança surge, menos reconfigurações são necessárias, e, conseqüentemente, menos custos são despendidos.

3.3.2 Passo 2: Análise dos processos

Background

A capacidade de lidar com diferentes produtos na mesma linha de montagem com pouca perda de produtividade é indicada como uma característica fundamental de sistemas de montagem flexíveis [22]. O surgimento de novos produtos e variantes de produtos e, conseqüentemente, a sua introdução nos processos de montagem, podem ter um impacto significativo sobre a configuração do sistema. Sempre que tal situação se verifica, a linha tem de ser analisada de modo a averiguar se os novos produtos podem ser montados sem alterações na sua configuração e, caso não seja possível, que reconfigurações devem ser implementadas.

Visto que a necessidade de introduzir reconfigurações na linha implica esforços e custos, a estratégia ideal passa por prevenir e evitar que estas sejam necessárias. Tipicamente, a estratégia mais eficiente é alcançada ao agrupar o sistema de montagem em sub-sistemas e módulos [58].

A modularização dos sistemas simplifica e padroniza o processo de montagem, facilitando assim a introdução de automação. Para efetuar este processo, os módulos são estabelecidos ao rever as similaridades entre as componentes do sistema [24]. Sob uma arquitetura modular, os níveis de flexibilidade e adaptabilidade do sistema são imediatamente potenciados, já que um conjunto finito de módulos possibilita a satisfação de um infinito conjunto de possíveis mudanças e cenários [21].

Procedimento

Dado o objetivo delineado para a metodologia, é de grande interesse estudar e explorar a influência dos resultados do passo 1 nos processos de montagem. Assim, propõe-se a realização de um procedimento dividido em três etapas.

Inicialmente, com o objetivo de possibilitar uma análise que inclua e relacione os conceitos de flexibilidade e nível de automação, propõe-se uma classificação das operações de montagem em 3 classes: Operações comuns, Operações comuns variáveis e operações específicas. Operações incluídas na primeira classe, correspondem à operações que são necessárias e idênticas para todos os produtos operados na linha. A segunda classe corresponde a operações que, apesar de estarem incluídas nos processos de montagem de todas as variantes, apresentam variações nos seus requisitos. Por fim, operações da terceira classe, correspondem a operações executadas exclusivamente para uma determinada variante. Como referido anteriormente, para proceder a realização deste processo, é necessário ter em conta o resultado da análise efetuada no passo 1 da metodologia.

As operações comuns são consideradas aquelas que apresentam maior interesse em serem automatizadas. Tal afirmação pode ser justificada tendo em conta dois pressupostos. Por um lado, dado que estas operações são necessárias independentemente do produto que está a ser operado na linha, torna-se útil otimizar a sua velocidade de execução, garantindo que o fluxo de materiais e

componentes é elevado e contínuo. Por outro lado, dado que estas operações permanecem invariáveis independentemente das variações dos produtos, a princípio, não necessitam de flexibilidade por parte do operador.

Operações específicas, por sua vez, são consideradas propícias à utilização de operadores humanos. Dado que podem ou não ser executadas no decorrer dos processos de montagem, máquinas instaladas na linha, especificamente para realizar estas operações, eventualmente, encontrar-se-ão paradas. Ao utilizar um recurso que apresente um elevado grau de flexibilidade, este poderá ser realocado e utilizado para executar outras operações, tornando a taxa de utilização de recursos consideravelmente mais elevada. Além disso, dada a sua natureza "customizada", a probabilidade de introdução de novas variantes de produtos que não compartilhem a mesma operação, acaba por tornar-se elevada. Esta desvantagem é também passível de ser ultrapassada através da presença de flexibilidade no operador. Esta característica é essencial para evitar que o recurso venha a tornar-se obsoleto e, conseqüentemente, acarrete desperdício de investimentos.

Finalmente, operações comuns variáveis podem ser consideradas como algo que se encontra entre as outras duas classes. Por um lado, ao serem comuns, são executadas sem exceções, beneficiando de velocidade para tal. Por outro lado, dado que possuem variações, necessitam de flexibilidade por parte do operador. As conclusões relativamente à importância de cada um destes requisitos para esta classe de operações não são tão intuitivas, sendo necessário realizar uma análise mais aprofundada, orientada à operação. No entanto, ao conjugar requisitos essenciais das duas outras classes, torna-se possível identificar a presença de um elevado potencial para cooperação.

O esquema seguinte resume e ilustra os principais requisitos de cada uma das classes propostas.

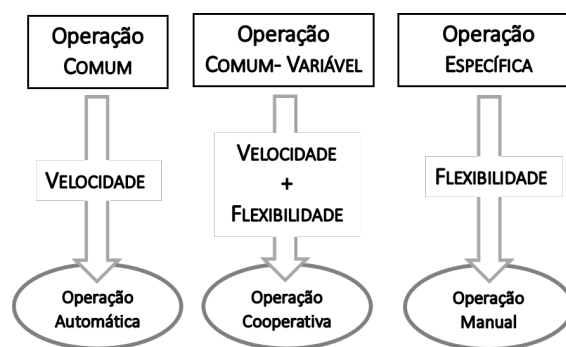


Figura 3.3: Requisitos essenciais das classes de operações

Baseado no pressuposto introduzido por [34], que indica que "a melhor utilização das capacidades robóticas e humanas é obtida em sistemas de montagem onde há uma divisão sequencial de tarefas", a próxima etapa corresponde à realização de uma análise de precedências das operações de montagem. A análise deverá ter em conta a classificação realizada na etapa anterior, sendo sugerida uma representação específica. As operações comuns devem ser representadas como o ramo principal do grafo de precedências, sendo estas diferenciadas caso sejam variáveis, e as operações

específicas devem estar dispostas em ramos adjacentes. Na figura 3.4 é apresentado um exemplo ilustrativo da representação de um grafo de precedências estruturado conforme sugerido.

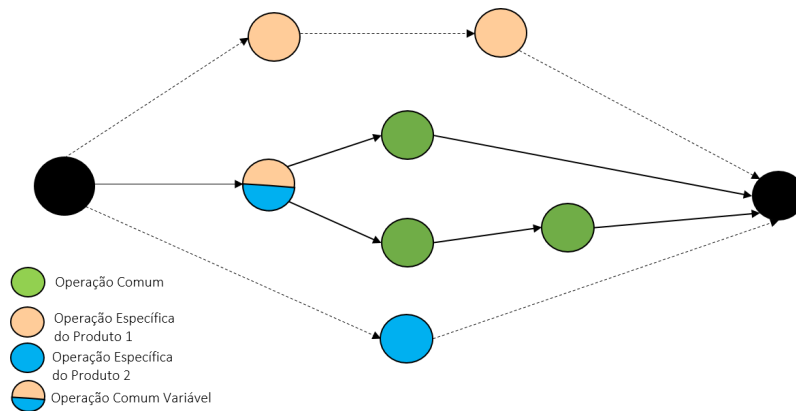


Figura 3.4: Representação do grafo de precedências sugerido pela metodologia

Por fim, para a realização da última etapa desta fase, um segundo pressuposto é considerado. Em [10], o autor afirma que "a melhor maneira de conjugar as características e capacidades robóticas e humanas é obtida quando as tarefas simples e generalistas são posicionadas a montante da linha e as tarefas mais complexas e variáveis, que conferem ao produto as suas características individuais e customizadas, são posicionadas a jusante da linha".

O esquema seguinte ilustra o referido pressuposto.

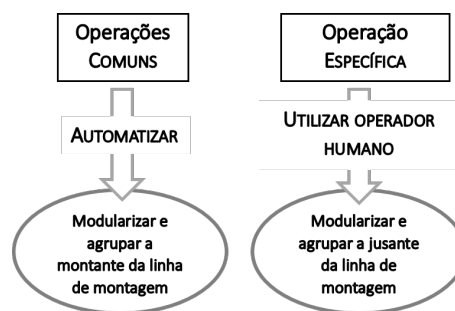


Figura 3.5: Estruturação da linha segundo a classe de operações

Apesar de esta afirmação estar de acordo com as constatações realizadas inicialmente, para que seja efetivamente válida, é necessária uma análise mais detalhada do processo em causa. Como evidenciado na etapa anterior, as operações de montagem implicam relações de precedência que, por sua vez, determinam uma sequência de montagem específica. Muitas vezes estas são extremamente rígidas, impondo, de forma absoluta, uma determinada configuração para o sistema. No entanto, existem situações onde a referida "rigidez" não se verifica, havendo a possibilidade de investigar e explorar as possibilidades de mudança no sequenciamento das operações, de modo a otimizar a configuração da linha de acordo com a estratégia seleccionada.

Assim, a terceira etapa deste passo corresponde a definição dos graus de liberdade de cada uma das sequências de montagem [9] para que, posteriormente, seja possível elaborar sequências alternativas e configurações mais vantajosas.

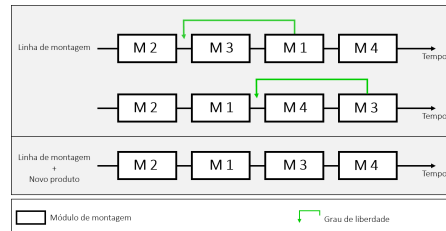


Figura 3.6: Configuração dos módulos da linha segundo os módulos do produto (Adaptado de [9])

3.3.3 Passo 3: Definição dos níveis de automação do sistema

Background

O passo seguinte foi estabelecido tendo como base um pressuposto fundamental, cujo interesse foi reconhecido após a fase de pesquisa. Este corresponde a uma constatação presente [24], onde é referido que "o sistema de montagem ideal para a turbulência verificada no mercado atual corresponde a um sistema modular semi-automático, apresentado como uma combinação de estações de trabalho flexíveis com diferentes graus de automação associados."

Procedimentos

Como constatado e enfatizado no capítulo 2, o processo referente à definição do nível de automação do sistema deriva, de forma direta, do processo de alocação de tarefas. Este, por sua vez, está intimamente relacionado com o conceito de cooperação homem-robô.

Na medida em que inclui e integra estes três conceitos-chave, esta etapa corresponde ao "core" da metodologia proposta, recebendo, portanto, uma maior atenção.

Os procedimentos aplicados nesta fase compreendem grande parte do esforço empregue no desenvolvimento da presente dissertação. Visto isto, cada um deles será exposto com elevado grau de rigor e detalhe.

3.3.3.1 Alocação de tarefas

Num mundo ideal, dada uma declaração completa dos requisitos de um sistema, a alocação de tarefas seria realizada pela aplicação de fórmulas matemáticas ou algoritmos. Contudo, este é um processo que inclui uma componente de abstração determinante e muito expressiva, já que considera inúmeras questões subjetivas, como avaliações de habilidades e competências. Considerando estas limitações, os procedimentos apresentados não pretendem o fornecimento de soluções absolutas. O objetivo real é, fornecer uma ferramenta capaz de orientar a realização de processos

de tomada de decisão em relação à alocação da mão-de-obra, sugerindo onde será mais vantajoso utilizar mão-de-obra humana e onde será útil introduzir automação e robôs.

As etapas do processo encontram-se resumidas e ilustradas na Figura 3.7.

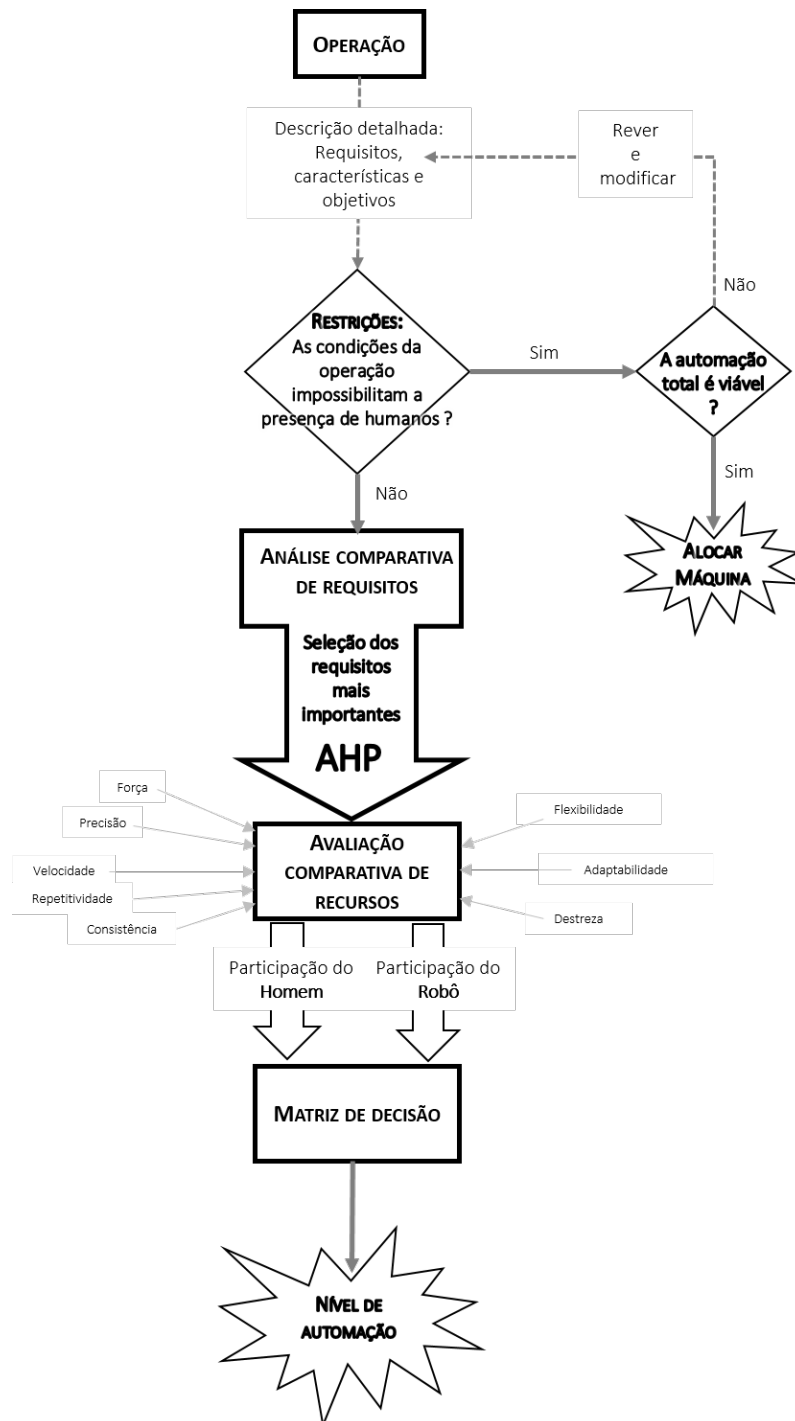


Figura 3.7: Esquematização do passo 3 da metodologia: Definição dos níveis de automação do sistema

3.3.3.1.1 *Análise de Restrições*

A primeira etapa do processo de alocação de tarefas consiste na identificação das restrições que inviabilizam a aplicação da metodologia. Esta corresponde a determinar se por uma ou mais razões, técnicas ou não técnicas, a participação de operadores humanos não pode ser considerada.

A deliberação deverá ser realizada com base na análise comparativa dos objetivos e requisitos da tarefa em questão com os seguintes critérios [59]:

- Regulamentações

Determinadas regulamentações ou políticas de trabalho podem ditar a proibição da utilização de mão de obra humana em determinadas operações.

- Condições Ambientais

Quando as condições ambientais pressupõem que um suporte de vida adequado não pode ser garantido ou suscita perigos para a saúde humana, a participação de operadores deve ser excluída. Estas, tipicamente, incluem:

- (a) Exposição a radiações
- (b) Calor
- (c) Ruído
- (d) Pressão atmosférica ou mudanças bruscas de pressão
- (e) Substâncias químicas ou biológicas nocivas
- (f) Vibração

Se o resultado desta comparação levar à conclusão de que a automação total é indispensável e, reconhecendo-se que os recursos necessários estão disponíveis, esta passa a ser a solução definida. No caso de a automação total ser considerada obrigatória, mas não viável, a declaração dos requisitos do sistema deverá ser revista de modo a contemplar a inclusão do homem e possibilitar a utilização da cooperação em sistemas semi-automáticos.

Se, por outro lado, as operações não apresentam as referidas limitações, passa-se para a segunda etapa do processo.

Apesar de se reconhecer a relevância das considerações anteriores, é importante referir que a maioria das funções do sistema não serão claras candidatas à exclusão definitiva de um dos tipos de recursos. Em vez disso, tendem a ser uma combinação entre a participação humana e a utilização de equipamentos e capacidades técnicas, para produzir o desempenho desejado com o nível de fiabilidade necessário [59].

Assim, considerando que as tarefas podem ser realizadas por operadores humanos, por máquinas ou por uma combinação de ambos, e que o processo de escolha entre opções associa vantagens e desvantagens específicas, torna-se necessário definir uma estratégia que proporcione uma visão agregada da conjugação destes pressupostos aquando do processo de decisão.

Análise de Requisitos

Como referido anteriormente, a decisão sobre a melhor alocação para as tarefas é uma questão longe de trivial. Para garantir que, em cada uma das operações, os requisitos mais importantes são efetivamente satisfeitos, o processo de decisão requer a seleção de múltiplos critérios de comparação.

Para tal, inicialmente foi realizada uma análise com o objetivo de determinar as situações onde as características específicas de cada um dos agentes apresentam-se como um fator limitativo para a sua utilização em operações de montagem. Tendo em conta o âmbito do trabalho desenvolvido, estas situações foram incorporadas num conjunto de requisitos passíveis de serem apresentados por uma operação de um sistema de produção. Estes foram cuidadosamente selecionados, tendo como base a informação apresentada em [59].

Os requisitos selecionados encontram-se descritos nas tabelas 3.1 e 3.2. Estas evidenciam, respetivamente, as limitações de humanos e robôs em relação aos requisitos apresentados.

Tabela 3.1: Requisitos que limitam a performance dos humanos na realização de tarefas

| <i>Requisitos</i> | <i>Descrição</i> |
|----------------------------------|--|
| Aplicação de Força | A necessidade de aplicação de força intensa, precisa ou prolongada limitam o desempenho satisfatório do operador humano. A força de pico instantânea dos seres humanos, em média, é limitada a uma intensidade máxima de 50 Newtons. |
| Resposta a Estímulos | O tempo de resposta médio dos seres humanos é de, aproximadamente, 100 ms para estímulos auditivos e 120 ms para estímulos visuais. Em casos que envolvam escolhas entre alternativas, o tempo é aumentado em cerca de 1 segundo. |
| Precisão de Calibração e Medição | Em operações que implicam a realização de cálculos excessivamente complexos ou demandam rigor em termos de precisão, com calibrações ou medições exatas, operadores humanos não representam um recurso eficiente. |
| Perceção de Estímulos | Operadores humanos mostram-se ineficientes ao desempenhar funções que requerem a deteção de estímulos, eventos ou que ocorrem com pouca frequência. |
| Performances prolongadas | Os humanos devem ser evitados em casos de funções que não podem ser interrompidas ou que exigem sustentar um estado de atenção ou alerta por longos períodos de tempo. |
| Multi-Tasking | Tipicamente, os humanos não são capazes de executar muitas operações em simultâneo, principalmente em casos onde é exigido esforço físico ou cognitivo. |

Tabela 3.2: Requisitos que limitam a performance das máquinas na realização de tarefas

| <i>Requisitos</i> | <i>Descrição</i> |
|--|---|
| Necessidade de Desenvolver Estratégias | Quando numa determinada operação não é possível prever de forma determinística certos aspetos da relação <i>input/output</i> da operação, torna-se impossível reduzi-la a um conjunto de procedimentos pré-definidos, impossibilitando também a sua execução automática. |
| Análises Subjetivas | Quando é necessário realizar análises ou avaliações que implicam desenvolvimento e aplicação de critérios subjetivos, como avaliação de performances, as máquinas representam um recurso incapaz. |
| Execução de uma ampla gama de operações | Apesar dos avanços em termos de incorporação de flexibilidade em máquinas, estas, tipicamente, são limitadas à realização das operações para as quais foram originalmente designadas. |
| Manipulação de materiais de estrutura deformável ou flexível | Os materiais manipulados muitas vezes mostram um comportamento deformável e imprevisível (estofos, borracha, tecido, etc). A presença de materiais deste tipo dificulta a atuação dos robôs já que obriga a que o operador seja capaz de adaptar-se, tornando a operação consideravelmente mais complexa. |

Ao analisar a informação apresentada nas tabelas anteriores torna-se possível concluir que, em geral, no caso dos humanos, a limitação do desempenho está diretamente relacionada com as suas limitações físicas e, no caso das máquinas, assenta na necessidade de apresentar capacidades humanas que não podem ser replicadas. Esta informação foi essencial para definir os critérios de comparação do processo de decisão.

CrITÉRIOS DE COMPARAÇÃO

Como referido anteriormente, a seleção dos critérios de comparação teve como fundamento a análise apresentada nas tabelas 3.1 e 3.2. Tendo em conta a natureza do problema, e os requisitos apresentados que, tipicamente, caracterizam as operações de montagem e influenciam a performance dos agentes, cada um dos critérios selecionados corresponde a uma necessidade que a tarefa poderá ou não apresentar e que um determinado agente terá mais ou menos capacidade de satisfazer.

Força: Este critério relaciona-se com a necessidade de aplicação de força na realização da operação. O seu peso é tanto maior quanto maior for a intensidade e/ou a duração da força necessária.

Precisão: Indica a relevância da precisão para a realização da tarefa. Necessidades de realização de medições, calibrações e/ou estimações, aumentam o peso atribuído a este critério.

Velocidade: Indica a necessidade de realizar a tarefa com velocidade.

Consistência: Avalia o rigor necessário para realização da tarefa. Este critério é tanto mais relevante quanto mais críticas forem as implicações das variações nos resultados da operação.

Repetitividade dos Movimentos: Apesar de não ser exatamente uma necessidade, este critério é essencial para caracterizar uma operação de montagem, já que evidencia os riscos ergonômicos da tarefa.

Flexibilidade: A flexibilidade diz respeito à necessidade de desempenhar funções diferentes quando os requisitos sofrem alterações. O número de alterações que a tarefa acarreta e a frequência com que estas ocorrem, ditam o grau de flexibilidade necessário. Assim, quanto maiores estes fatores, maior o peso da flexibilidade.

Adaptabilidade: A adaptabilidade reflete a presença de variabilidade e inconsistências nas condições da operação. Um exemplo é a variação da posição dos produtos na linha, ou a necessidade de encontrar um produto misturado entre outros.

Destreza de Movimentos: Este critério relaciona-se com a dificuldade em traduzir a operação numa sequência absoluta de passos. Este reflete, por exemplo, a necessidade de realizar ajustes de movimentos no decorrer da operação.

Ao realizar a correspondência dos critérios selecionados com a informação presente nas tabelas 3.1 e 3.2 é possível concluir que, tipicamente, os critérios correspondentes a força, precisão, velocidade, consistência e repetitividade de movimentos atribuem mais vantagens a utilização de máquinas e a flexibilidade, adaptabilidade e destreza de movimentos favorecem a utilização de humanos.

Por um lado, para tornar o processo de decisão vantajoso para todas as operações, os critérios foram selecionados de modo a serem tão generalistas quanto possível. Por outro lado, para o tornar vantajoso para cada uma das operações, cada critério será analisado segundo a sua importância relativa.

Uma vez que os sistemas de montagem, tipicamente, apresentam inúmeras operações, cada uma com características e necessidades específicas, a avaliação dos critérios não é uma decisão linear. Muitas vezes, apesar de comparáveis, os critérios podem ser dependentes ou verificarem-se conflitantes. De modo a garantir que estes fossem devidamente avaliados, a abordagem passou pela utilização do método AHP [26, 27]. Este método, desenvolvido para lidar com problemas de decisão complexos, incorpora medidas de avaliação que permitirão pesar os critérios selecionados.

As comparações são realizadas utilizando uma escala de prioridades baseada em julgamentos absolutos que representam o quanto um elemento domina o outro em relação a um determinado atributo [27]. A informação descritiva de cada uma das escalas encontra-se

apresentada na tabela 3.3.

Tabela 3.3: Escala de prioridades utilizada na análise AHP

| Escala verbal | Valores numéricos |
|-----------------------|-------------------|
| Igualmente importante | 1 |
| Importância moderada | 3 |
| Mais importante | 5 |
| Muito mais importante | 7 |
| Importância extrema | 9 |
| Valores intermédios | 2, 4, 6, 8 |

Método AHP

As etapas processuais de aplicação do método correspondem às seguintes :

1. Decomposição do problema de decisão

Esta corresponde a definir o problema e, de seguida, estruturá-lo através de um diagrama hierárquico. A hierarquia é estruturada de modo a apresentar o objetivo da análise no nível superior, os critérios de decisão nos níveis intermédios e as alternativas de solução no nível mais baixo.

No âmbito do problema, o objetivo corresponde a selecionar o agente mais apropriado para otimizar a performance de uma determinada tarefa, as soluções possíveis dizem respeito à utilização de um robô ou de um operador humano, e os critérios correspondem às características relevantes das operações de montagem que influenciam o desempenho dos agentes, definidos anteriormente.

A figura 3.8 ilustra a estruturação do problema que a metodologia se propõe a resolver.

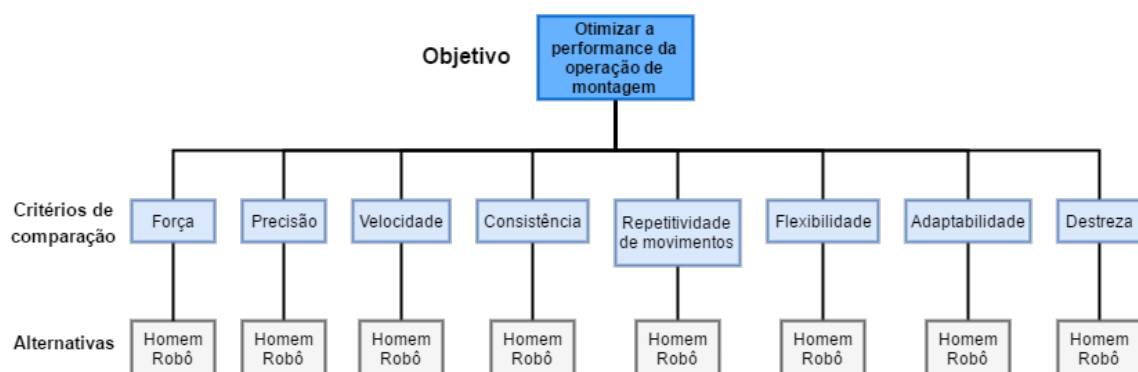


Figura 3.8: Diagrama hierárquico do método AHP

2. Determinar o competência das alternativas na satisfação dos critério

Esta etapa corresponde a realização de uma avaliação comparativa da performance de

cada uma das alternativas de solução, neste caso robôs e humanos, na satisfação dos critérios selecionados. O resultado indica a capacidade apresentada pelo agente, de satisfazer a necessidade representada pelo critério.

A figura 3.9 ilustra uma das matrizes de comparação utilizadas para o efeito. Neste caso, considera-se que o robô é 7 vezes mais capaz que o humano de satisfazer a necessidade de "força" na realização da operação. O procedimento realizado para efetuar o cálculo do peso, apresentado na imagem, será detalhado de seguida.

| Força | Humano | Robot |
|--------|--------|-------------|
| Humano | 1 | 0,142857143 |
| Robot | 7 | 1 |

Matriz Normalizada

| Força | Humano | Robot | Peso |
|--------|--------|-------|-------|
| Humano | 0,125 | 0,125 | 0,125 |
| Robot | 0,875 | 0,875 | 0,875 |

Figura 3.9: Matriz de comparação par-a-par para as alternativas em relação à necessidade de força

É necessário salientar que a atribuição destes valores não foi fundamentada em dados técnicos. Estes foram definidos, exclusivamente, com base na literatura [10, 25, 42] e recorrendo ao auxílio de investigadores da área da robótica. Apesar de não fornecer informações rigorosas, considerou-se que esta análise era passível de ser utilizada como prova de conceito.

As tabelas elaboradas para cada um dos critérios encontram-se apresentadas no Anexo .

3. Atribuição de pesos aos critérios

Nesta etapa, são atribuídos pesos a cada um dos critérios segundo as características e requisitos da tarefa indicada como objetivo da análise. Dado que existe a possibilidade de nem todos os critérios acarretarem importância na realização de uma determinada tarefa, os critérios a considerar na análise são definidos inicialmente pelo decisor.

A escala utilizada corresponde à apresentada na tabela 3.3.

Ao atribuir os pesos, o decisor tece considerações sobre a importância de um critério relativamente ao outro, através do método de comparação par-a-par. Quando auto-comparados, os elementos recebem um valor igual a 1. Quando comparados com outros, supondo que existem n critérios incluídos, a comparação par-a-par do critério i em relação ao j produz uma matriz quadrada, $A1$, onde a_{ij} corresponde a importância comparativa do critério i em relação ao j e onde $a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}$.

A figura 3.10 ilustra a matriz AHP elaborada.

| Operação | Força | Precisão | Velocidade | Consistência/Rigor | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
|-------------------------------|-------|----------|------------|--------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| Força | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Precisão | 0,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 3,00 | 0,00 | 7,00 |
| Velocidade | 0,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 3,00 | 0,00 | 7,00 |
| Consistência/Rigor | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Habilidades Computacionais | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Flexibilidade | 0,00 | 0,33 | 0,33 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 0,00 | 3,00 |
| Adaptabilidade | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 0,00 |
| Destreza | 0,00 | 0,14 | 0,14 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,33 | 0,00 | 1,00 |
| Total Colunas | 0,00 | 2,48 | 2,48 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 7,33 | 0,00 | 18,00 |
| Robôs | | | | | | | | | |
| Humanos | | | | | | | | | |
| Número de Critérios | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | |

Figura 3.10: Matriz AHP

Neste caso os requisitos considerados importantes encontram-se assinalados a azul. A atribuição de pesos refere que a precisão e a velocidade são igualmente importantes entre si, moderadamente mais importantes que a flexibilidade e muito mais importante que a destreza. A destreza, por sua vez, é considerada moderadamente menos importante que a flexibilidade.

Para proceder ao cálculo dos pesos estimados, é necessário, inicialmente, realizar a normalização da matriz de comparação através do seguinte conjunto de passos:

- Calcular a soma dos valores presentes em cada uma das colunas correspondentes aos critérios seleccionados.
- Dividir os valores em cada célula da coluna pelas correspondentes somas das colunas. Na figura 3.11 é apresentada a matriz resultante do processo de normalização da matriz A1.

| MATRIZ AHP NORMALIZADA | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| Operação | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
| Força | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Precisão | 0,00 | 0,40 | 0,40 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,41 | 0,00 | 0,39 |
| Velocidade | 0,00 | 0,40 | 0,40 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,41 | 0,00 | 0,39 |
| Consistência | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Habilidades Computacionais | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Flexibilidade | 0,00 | 0,13 | 0,13 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,14 | 0,00 | 0,17 |
| Adaptabilidade | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Destreza | 0,00 | 0,06 | 0,06 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | 0,00 | 0,06 |

Figura 3.11: Representação da matriz AHP (A1) normalizada

Feito isto, o valor correspondente ao peso relativo de cada um dos critérios é obtido através do cálculo média dos valores em cada uma das linhas da matriz normalizada. A figura 3.12 indica os pesos resultantes da análise exemplificada.

| PESO DOS CRITÉRIOS [AHP] | | | | | | | | | |
|--------------------------|-------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| Operação | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
| Peso | 0,00 | 0,40 | 0,40 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,14 | 0,00 | 0,05 |
| Peso (%) | 0,00 | 40,14 | 40,14 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 14,31 | 0,00 | 5,41 |

Figura 3.12: Representação dos pesos que cada um dos critérios comporta na realização da operação

Dado que os julgamentos dependem do decisor, a inconsistência das decisões deve ser considerada. Assim, para medir a consistência do resultado e fornecer ao decisor a possibilidade de atuar de modo a torna-la mais satisfatória, o seguinte procedimento deverá ser realizado [27].

- i) Calcular a matriz A2, de modo a que seja equivalente a matriz dos pesos dos critérios (3.12) transposta.

| Matriz_Pesos Transposta | |
|-------------------------------|-------|
| Força | 0,000 |
| Precisão | 0,401 |
| Velocidade | 0,401 |
| Consistência | 0,000 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0,000 |
| Habilidades Computacionais | 0,000 |
| Flexibilidade | 0,143 |
| Adaptabilidade | 0,000 |
| Destreza | 0,054 |

Figura 3.13: Representação dos pesos transposta

- ii) Calcular a matriz A3, de modo a que A3 seja igual ao produto entre as matrizes A1 (3.10) e A2 (3.13). A figura 3.14 ilustra o resultado esperado.

| Operação | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
|-------------------------------|-------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| Força | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Precisão | 0,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 3,00 | 0,00 | 7,00 |
| Velocidade | 0,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 3,00 | 0,00 | 7,00 |
| Consistência | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Habilidades Computacionais | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Flexibilidade | 0,00 | 0,33 | 0,33 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 0,00 | 3,00 |
| Adaptabilidade | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 | 0,00 |
| Destreza | 0,00 | 0,14 | 0,14 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,33 | 0,00 | 1,00 |

Figura 3.14: Passo intermédio para o cálculo do índice de consistência

- iii) Realizar o cálculo da seguinte equação:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\text{entrada } i \text{ do resultado da Figura 3.14}}{\text{entrada } i \text{ da matriz da Figura 3.13}}$$

iv) Calcular o índice de consistência (IC), através da seguinte equação:

$$IC = \frac{\text{Resultado Passo iii} - n}{n - 1}$$

v) Comparar o valor de IC com o índice aleatório IA para o correspondente n.

Os valores do índice aleatório são valores padrão fornecidos pelo método. Estes encontram-se presentes na tabela.

Tabela 3.4: Índice aleatório IA

| Número de critérios (n) | IA |
|-------------------------|----|
| 2 | 0 |
| 3 | 0 |
| 4 | 0 |
| 5 | 0 |
| 6 | 0 |
| 7 | 0 |
| 8 | 0 |
| 9 | 0 |
| 10 | 0 |

Se $\frac{IC}{IA} < 0.1$, considera-se que o grau de consistência é satisfatório. Caso não se verifique, o decisor deve rever a decisão relativa a atribuição dos pesos de modo a torná-la mais consistente.

3. Definição do desempenho global das alternativas

Por fim, a etapa 3, corresponde à obtenção da pontuação relacionada ao desempenho de cada uma das alternativas.

Inicialmente, o valor do peso definido para cada critério (Figura 3.12) é multiplicado pelo valor atribuído ao desempenho de cada agente na satisfação deste critério (Figura 3.9). De seguida, os resultados são somados para obtenção da performance global do agente na realização da tarefa em questão. A figura 3.15 ilustra a matriz de resultados.

| PESO DAS ALOCAÇÕES | | | | | | | | | | |
|--------------------|-------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|-------------|
| Operação | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza | TOTAL |
| Humano | 0,00 | 0,04 | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,10 | 0,00 | 0,05 | 0,234384713 |
| Robot | 0,00 | 0,36 | 0,35 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | 0,00 | 0,01 | 0,765615287 |

Figura 3.15: Representação dos resultados finais da análise AHP

Os valores finais obtidos indicam a forma como cada uma das alternativas de solução satisfazem os critérios selecionados, fornecendo informação relevante sobre a importância destes para alcançar o objetivo definido.

Para facilitar futuras análises, os resultados são apresentados em diagramas ilustrativos, conforme ilustrado na figura 3.16.

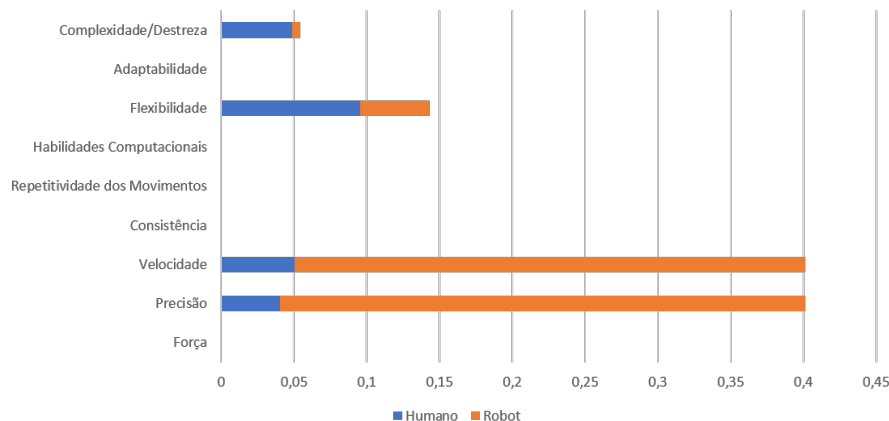


Figura 3.16: Diagrama representativo do peso de cada um dos requisitos e dos agentes na realização da operação

O diagrama apresentado ilustra, de forma clara, os resultados relativos ao peso de cada critério na operação considerada e ao desempenho de cada um dos agentes na satisfação deste critério. No exemplo apresentado, a velocidade e a precisão são os requisitos mais importantes, e o robô é o recurso que melhor desempenhará esta tarefa.

A ilustração dos pesos atribuídos ao agente cujo desempenho não é o mais vantajoso será útil para definir, em casos em que é necessária cooperação, de que forma este deverá atuar. Neste caso, a flexibilidade representa o critério que o humano deverá satisfazer. Assim, a cooperação poderia ser utilizada, por exemplo, no sentido de o humano reprogramar a máquina ou efetuar trocas nas suas ferramentas de manipulação.

3.3.3.2 Decisão do nível de Automação

Como referido no capítulo 2, o conceito de nível de automação pode ser empregue em vários níveis do sistema, desde o mais baixo, correspondendo à operação de montagem, passando pelo nível intermédio, representado pelas estações de trabalho, até o nível mais alto correspondendo a linha em si. Cada uma das classificações é diretamente dependente da outra. O nível de automação da linha de montagem é definido pelo conjunto dos níveis de automação das estações de trabalho que, por sua vez, é definido pelo conjunto dos níveis apresentados pelas operações que a compõem. Assim, dada a referida relação hierárquica, efetuar uma análise dedicada ao nível mais baixo do sistema, além de indicar resultados específicos, proporciona conclusões globais.

Tendo como base as diferentes possibilidades de cooperação e, como foco principal, o interesse na inclusão do conceito de flexibilidade, o seguinte conjunto de níveis de automação foi elaborado:

Tabela 3.5: Proposta de classificação para níveis de Automação em operações de montagem

| <i>Nível de Automação</i> |
|--|
| 1 – Operação totalmente manual |
| 2 – Operador humano + ferramenta automática de suporte |
| 3 – Robô flexível + Operador Humano |
| 4 – Robô industrial tradicional + Suporte Manual |
| 5 – Operação totalmente Automática |

Antes de proceder à descrição de cada um dos níveis, é interessante clarificar as principais diferenças entre os tipos de recursos considerados. Na tabela 3.6 encontram-se definidas as características de cada um dos robôs, segundo diferentes parâmetros.

Tabela 3.6: Robôs Industriais tradicionais vs. Robôs Flexíveis

| Parâmetros de comparação | Robôs industriais tradicionais | Robôs flexíveis | Humanos |
|---------------------------------|---------------------------------------|------------------------|----------------------------|
| Velocidade | Elevada | Moderada | Limitada |
| Esforços de Reprogramação | Elevados | Relativamente baixos | Capacidade de aprendizagem |
| Adaptabilidade | Baixa | Baixa | Elevada |
| Flexibilidade | Baixa | Moderada | Elevada |
| Destreza | Baixa | Moderada | Elevada |

Estes pressupostos foram utilizados como base para a definição dos níveis de automação. Tendo presente as informações apresentadas na tabela 3.6, torna-se mais fácil compreender a descrição realizada de seguida.

Nível 1

O nível 1 corresponde a uma operação totalmente manual. Operações com este nível de automação atribuem elevada importância aos requisitos vantajosos para humanos e dispensam aqueles que favorecem a automação. Ou seja, o operador humano é capaz de desempenhar a tarefa sem necessitar de qualquer tipo de suporte ou ferramenta automática. Operações de inspeção de qualidade ou operações que impliquem trabalhos manuais artesanais são exemplos típicos deste nível de automação.

Nível 2

O nível 2 é empregue em operações onde, apesar de as características dos humanos serem essenciais, estes não são capazes de as desempenhar sem recorrer a ferramentas automáticas de suporte. Tipicamente, operações classificadas neste nível correspondem a operações manuais onde as capacidades físicas dos humanos não são suficientes, como

a necessidade de emprego de força ou a necessidade de realização de uma tarefa a uma velocidade que supere a capacidade humana.

Nível 3

O nível 3 corresponde a operações realizadas por robôs flexíveis em cooperação com humanos. Em termos de flexibilidade e destreza de movimentos, robôs deste tipo são consideravelmente superiores a robôs industriais tradicionais. Ainda assim, apesar de a tarefa ser de responsabilidade do robô, considera-se que o humano tem um papel interventivo relevante. Estes, tipicamente, atuarão numa perspetiva de controlo da ação, podendo ser tanto a nível mecânico, como posicionamento do braço robótico como a nível lógico, como ativação de um determinado comportamento do robô por meio de um botão.

Nível 4

O nível 4 corresponde a utilização de robôs industriais tradicionais. Este nível será, tipicamente, empregue a operações onde os requisitos não impõem a atuação do humano na realização da tarefa em si, sendo o seu papel utilizado numa perspetiva limitada ao fornecimento de suporte. Isto significa que o humano não intervém na ação do robô, mas apenas controlam o ambiente que o rodeia, podendo atuar, por exemplo, para modificar ou corrigir transportadores ou a posição de produtos.

Nível 5

Neste nível, a automação empregue é totalmente autónoma. A operação desvaloriza todos os requisitos onde a mão de obra manual é vantajosa ou necessária, dispensando todo e qualquer tipo de envolvimento de operadores humanos. Operações que apresentam este nível de automação caracterizam-se, tipicamente, por serem extremamente repetitivas e não ergonómicas.

A próxima etapa deste passo da metodologia, corresponde a relacionar os resultados obtidos após a seleção do melhor agente a ser alocado para executar a operação, com os níveis de automação propostos.

Matriz de Decisão

Os resultados obtidos após a realização do passo anterior podem ser representados num espaço de decisões, onde cada uma das operações é representada por um ponto no espaço. As coordenadas x e y serão obtidas a partir da análise AHP realizada para a operação em causa. Estas correspondem, respetivamente, ao peso atribuído ao desempenho previsto dos seres humanos e dos robôs, respetivamente, na realização da tarefa.

A matriz de decisão será dividida em 5 zonas, correspondendo aos 5 níveis de automação propostos. A definição dos limites espaciais de cada uma das zonas foi realizada através do procedimento descrito de seguida.

Definição dos Limites

Inicialmente foram definidos os limites das zonas referentes aos níveis 1 e 5, ou seja,

onde o nível de automação não implica cooperação entre os agentes. Para tal, foram definidas operações cujos requisitos implicassem o domínio absoluto de um dos agentes perante o outro.

De seguida, para definir as zonas onde existe cooperação, o primeiro procedimento correspondeu à divisão do espaço de decisões pela reta $x=y$. Assim, operações alocadas acima da reta correspondem a tarefas onde os robôs terão, a priori, um papel preponderante na cooperação e, operações alocadas abaixo, indicam o contrário. Numa fase posterior, esta reta foi ajustada ao considerar uma operação onde critérios favoráveis a ambos os agentes apresentassem importâncias igualmente elevadas.

Apesar de a individualidade dos seres humanos ser um fator elementar, e particularmente característico, no âmbito da presente dissertação estes são considerados igualmente habilidosos e, portanto, igualmente flexíveis. Assim, a área correspondente à zona em que os humanos dominam a cooperação não será alvo de mais subdivisões, sendo definida como o nível 2. No entanto, estas considerações não podem ser aplicadas a respeito das máquinas. As variações entre os tipos de máquinas automáticas disponíveis no mercado acarretam uma diferença significativa na satisfação de determinados requisitos, principalmente em termos de flexibilidade. Assim, a zona compreendida acima da diagonal central será sub-dividida em duas zonas de menor dimensão, correspondendo à diferenciação das máquinas em termos de flexibilidade. Visto que a zona mais próxima da diagonal central indica que as características vantajosas dos humanos apresentam um peso mais elevado e, sabendo que a flexibilidade é considerada uma característica vantajosa para o humano, esta corresponderá ao nível 3. Por fim, o nível 4 corresponderá a zona onde os requisitos da tarefa não impõem a valorização das características humanas, sendo o seu papel limitado ao fornecimento de suporte. A definição dos limites entre as zonas cooperativas foi realizada ao considerar exemplos de operações com requisitos definidos de modo a que resultassem em alocações ambíguas, ou seja, entre zonas.

As operações consideradas e os correspondentes requisitos serão apresentadas de seguida. As matrizes AHP resultantes desta análise encontram-se presentes no Anexo .

Limite 1-2: O limite desta tarefa foi calculado ao considerar uma operação onde dois requisitos favoráveis ao desempenho humano são considerados muito importantes e um dos requisitos que limitam o desempenho humano é considerado necessário, neste caso, a força. Ao atribuir peso a este último, considera-se que um humano já não é capaz de desempenhar esta operação sozinho, havendo necessidade de cooperação.

Limite 2-3: O limite entre os níveis 2 e 3 foi estabelecido ao considerar que os critérios relevantes fossem igualmente favoráveis para ambos os agentes. Para isso, considerou-se o mesmo número de critérios favoráveis a cada um dos agentes, atribuindo pesos equivalentes entre eles.

Limite 3-4: Este nível corresponde à diferenciação dos robôs em termos de flexibilidade. Tendo em conta este fato, o limite correspondente foi determinado ao considerar

uma operação onde foi atribuída importância a 3 requisitos vantajosos para os robôs, além da flexibilidade. Dois deles foram considerados igualmente mais importantes que a flexibilidade, e ao terceiro foi atribuída uma menor importância. O objetivo foi identificar um ponto onde a importância atribuída à flexibilidade passa a ter influência significativa na alocação, apesar de não ser o requisito mais importante.

Limite 4-5: Para definir este limite, a operação a considerar foi idealizada de modo a que os requisitos favoráveis fornecessem vantagens maioritariamente às máquinas, porém, necessitasse de um fator que, mesmo que de forma minimalista, obrigasse o envolvimento humano. Tendo em conta este fato, o limite correspondente foi calculado ao considerar uma operação onde foi atribuída importância igualmente elevada a dois requisitos vantajosos para robôs e uma importância menor a um dos requisitos do homem, neste caso a destreza.

A figura 3.17 ilustra a matriz de decisão resultante.

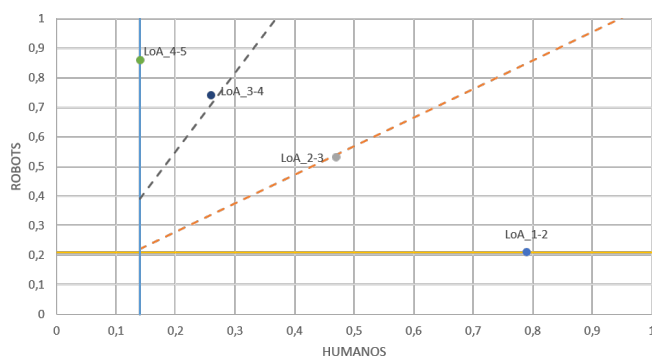


Figura 3.17: Matriz de Decisões e representação dos limites entre níveis

Após realizar cada passo de cada um procedimentos descritos, o resultado final indicará o nível de automação mais apropriado para cada uma das operações da linha de montagem. Como referido anteriormente, a partir desta informação torna-se possível determinar o nível de automação das estações de trabalho e da linha de montagem em si.

O diagrama 3.18 ilustra o processo de determinação dos níveis de automação do sistema.

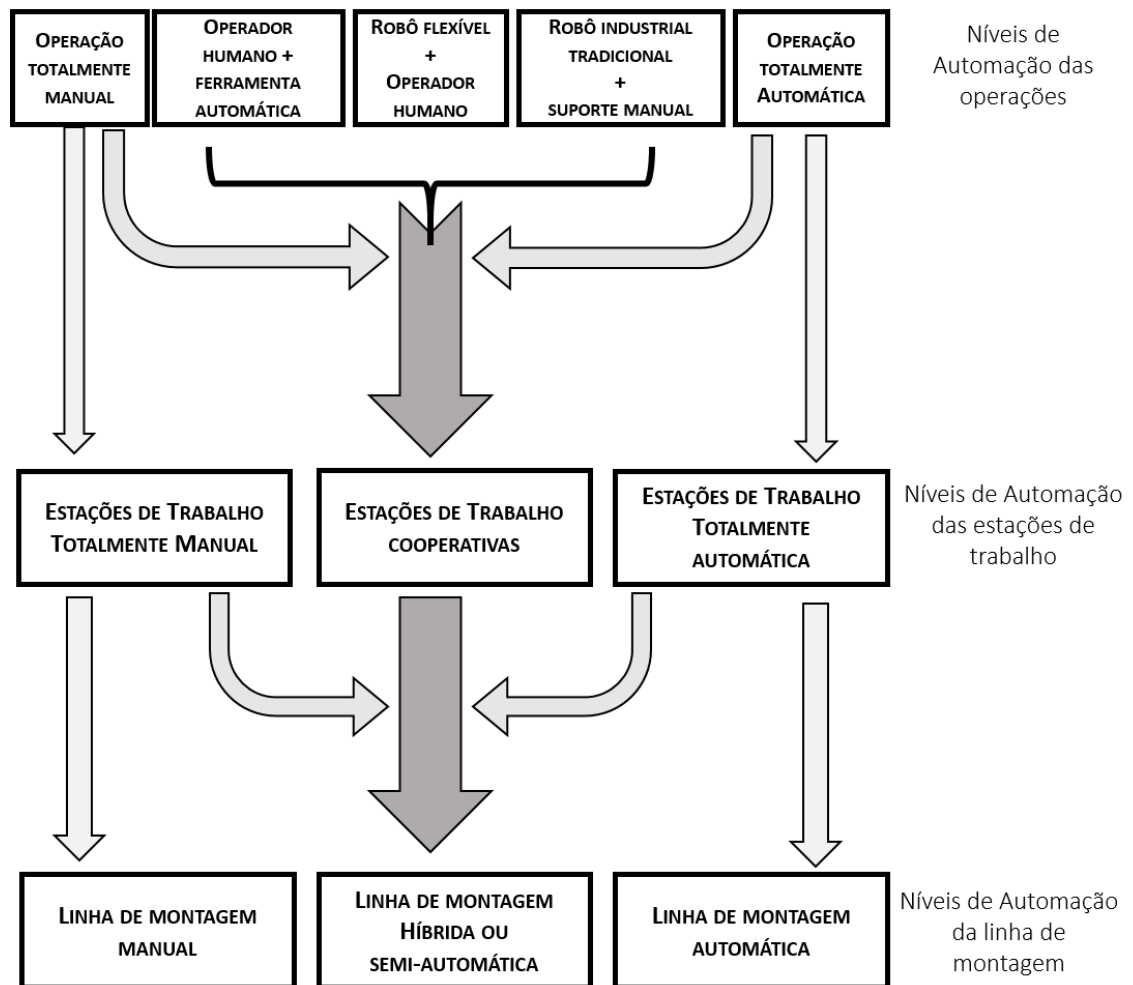


Figura 3.18: Níveis de automação do sistema de montagem

Capítulo 4

Aplicação ao caso de estudo

4.1 Descrição do caso de estudo

Para demonstrar a aplicabilidade da metodologia desenvolvida procedeu-se à sua aplicação a um caso de estudo real fornecido por uma empresa do setor automóvel. Este, diz respeito a uma fabrica especializada na montagem de motores, que pretende ser capaz de comportar a operação de duas variantes diferentes na mesma linha de montagem. Para tal, a empresa conceptualizou uma linha piloto ideal que engloba, fundamentalmente, a aplicação de dois conceitos fundamentais: montagem "*mixed-model*" e reconfiguração dinâmica. Através da conjugação destes conceitos, a linha pode ser definida como uma linha de montagem sequencial, flexível, ágil e reconfigurável que opera, de forma eficiente, 2 tipos de motores, um a gasolina de 3 cilindros (EB) e um a diesel de 4 cilindros (DVR).

A organização do chão de fábrica foi estabelecida de modo a garantir o seu alinhamento com os requisitos do produto. Uma vez que, a estratégia compreende a otimização da reconfigurabilidade do sistema, os conceitos de modularização de produtos e modularização de sistemas são também aplicados e conjugados. Dado que, o processo de modularização dos produtos originou a sua divisão em três módulos principais (cabeça do cilindro, bloco do cilindro e produto final), a área da fábrica foi, de forma equivalente, dividida em três grandes partes. Estas correspondem aos módulos do sistema, conforme ilustrado na figura 4.1.

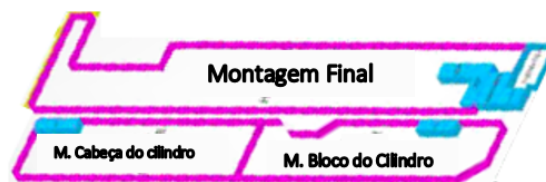


Figura 4.1: Representação do chão de fábrica correspondente ao caso de estudo

Cada um dos módulos é constituído por uma linha de montagem que comporta as operações específicas de cada uma das partes. Por ser suficientemente representativa, o presente estudo focar-se-á apenas no módulo de montagem correspondente ao bloco do cilindro.

4.1.1 Requisitos funcionais

A linha de montagem é composta por 5 estações de trabalho, cada uma correspondendo a uma localização física da planta. Estas estão dispostas ao longo da linha de montagem, de forma sequencial, segundo a sequência pré-definida de operações.

Os dois tipos de motores implicam processos de montagem individuais, que reúnem operações comuns, executadas independentemente da variante, e específicas, executadas de acordo com a variante. A cada operação é alocado um agente, podendo este ser um humano, um robô ou uma máquina fixa. As estações de trabalho podem empregar operações de uma ou de ambas as variantes, respeitando as sequências de montagem específicas de cada uma. A linha é do tipo "*paced assembly line*", ou seja, o tempo que os motores permanecem nas estações de trabalho é fixo e constante. O conjunto de operações realizadas para cada uma das variantes numa estação de trabalho é sempre o mesmo.

4.1.2 Proposta atual

A linha de montagem conceptualizada pela empresa foi apresentada como uma linha auto-adaptativa, enfatizando os conceitos de linha ágil e totalmente flexível. Esta visão assenta no paradigma de sistemas de montagem reconfiguráveis e baseia-se nos princípios de reconfiguração dinâmica de linhas de produção.

De modo a ultrapassar quaisquer limitações no processo de idealização da linha, o conceito de robôs *DiFLEX* (Dinâmicos e Flexíveis) foi introduzido. Estes robôs caracterizam-se pela capacidade de desempenhar toda e qualquer operação de montagem e, pela possibilidade de se moverem ao longo da mesma sem qualquer tipo de restrições.

A conceptualização inicial da linha, indica que todas as operações específicas de uma variante são realizadas por robôs *DiFLEX*. Em cada ciclo de produção, estes são solicitados de acordo com as necessidades do sistema no decorrer da sequência de operações. Se disponível, o robô move-se até a estação de trabalho onde deve atuar, executa a operação de montagem e volta a esperar por uma nova solicitação. Cada deslocação realizada por um robô *DiFLEX* é vista como uma reconfiguração da linha.

Em relação à realização das operações comuns, a estratégia passa por aplicar os princípios de abordagens centrados em tecnologia ("*technological centered approach*"), ou seja, todas as operações cujos requisitos técnicos não impossibilitem o emprego de automação devem, efetivamente, ser desempenhadas por recursos automáticos.

A lista de operações de montagem realizadas em cada uma das estações de trabalho foi fornecida pela empresa. A informação foi apresentada conforme ilustrado na Figura 4.2.

| Workstation | Operações Comuns | Workstation | Operações Específicas DVR | Workstation | Operações Específicas EB |
|-------------|--|---|--|--|--|
| WS1 | Separação das tampas da biela (x3) | WS1 | Separação das tampas da biela (x3) | WS1 | Separação das tampas da biela (x3) |
| | Pick & Place: tampas da biela (x3) | | Separação das tampas da biela (x1) | | Pick & Place: tampas da biela (x3) |
| | Instalação do Pistão no bloco do cilindro (x3) | | Pick & Place: tampas da biela (x3) | | Instalação do Pistão no bloco do cilindro (x3) |
| | Inspeção do Pistão (Controlo de visão) (x3) | | Pick & Place: tampas da biela (x1) | | Instalação do bloco de circulação de água |
| WS2 | Inversão do Motor | | Instalação do Pistão no bloco do cilindro (x3) | WS2 | Inspeção do Pistão (Controlo de visão) (x3) |
| | Inserção de 2 pinos tipo A (x3) | | Instalação do Pistão no bloco do cilindro (x1) | | Inversão do Motor |
| WS3 | Inserção 2 pinos tipo B (x3) | | Inspeção do Pistão (Controlo de visão) (x3) | WS3 | Inserção de 2 pinos tipo A (x3) |
| | Inserção de 1 pino do tipo C (x3) | Inspeção do Pistão (Controlo de visão) (x3) | Inserção 2 pinos tipo B (x3) | | |
| | Aspiração: tampas da biela (x3) | Inversão do Motor | Inserção de 1 pino do tipo C (x3) | | |
| | Leitura do Código de barras "DataMatrix reading" na biela (x3) | Inserção de 2 pinos tipo A (x3) | Aspiração: tampas da biela (x3) | | |
| | Inspeção do Bloco do Motor | Inserção de 2 pinos tipo A (x1) | Leitura do Código de barras "DataMatrix reading" na biela (x3) | | |
| | | | Inspeção do Bloco do Motor | | |
| WS3 | Inserção 2 pinos tipo B (x3) | WS3 | Inserção 2 pinos tipo B (x1) | WS8 | Pick & Place: Árvore de cames |
| | Inserção de 1 pino do tipo C (x3) | | Instalação da Árvore de Cames | | |
| | Inserção de 1 pino do tipo "D" | | WS9 | Instalação da correia | |
| | Aspiração: tampas da biela (x3) | | | Aparafusamento de 8 parafusos da Árvore de Cames | |
| | Aspiração: tampas da biela (x1) | | | | |
| | Aspiração do bloco do motor | | | | |
| | Leitura do Código de barras "DataMatrix" da biela (x3) | | | | |
| | Leitura do Código de barras "DataMatrix" da biela (x1) | | | | |
| | Inspeção do Bloco do Motor | | | | |

Figura 4.2: Classificação inicial das operações de montagem

A conceptualização inicial da linha piloto é ilustrada na figura 4.3.

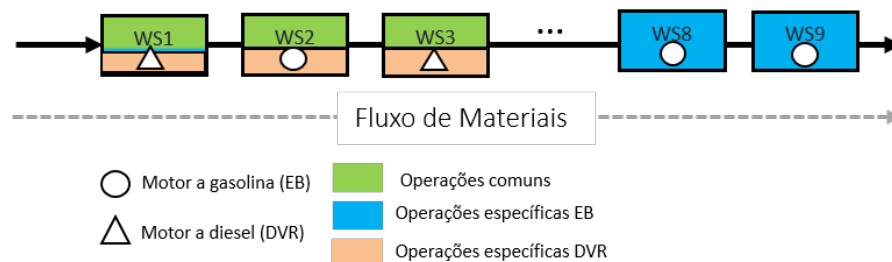


Figura 4.3: Representação esquemática da linha de montagem apresentada no caso de estudo

4.1.3 Oportunidades

Apesar de, tipicamente, estratégias focadas na utilização de elevados níveis de automação serem benéficas para promover o aumento da produtividade da linha e a melhoria dos requisitos de qualidade do produto, a utilização de abordagens deste tipo implica uma redução significativa dos níveis de flexibilidade e adaptabilidade da linha. Tal facto, é especialmente prejudicial no caso de sistemas que apresentem necessidades de flexibilidade, como é o caso de linhas “*mixed-model*”.

Tendo em conta a elevada variedade de operações realizadas na linha e a singularidade das suas características, possíveis vantagens podem ser consideradas ao realizar um processo de alocação de tarefas orientado aos requisitos da operação. Ao garantir níveis apropriados de automação em cada uma das operações, espera-se efeitos positivos sobre a performance do sistema que podem ser traduzidos, por exemplo, em reduções dos tempos de ciclo e aumento da produtividade.

A classificação atual das operações suscita também uma oportunidade de melhoria. Ao analisar a informação disponibilizada na Figura 4.6 torna-se notório o facto de a grande maioria das operações específicas dos motores a diesel corresponder à realização de uma operação comum uma vez mais, devido ao facto de este possuir um cilindro adicional. Tal facto sugere que esta operação, ao contrário do que considera a proposta atual, possa ser tratada como uma operação comum variável, que necessita de reprogramação em consequência do número de vezes que terá de ser realizada. Conforme mencionado na secção 3.3.2, esta modificação poderia trazer benefícios na medida em que, considerando as capacidades dos operadores humanos, ao estarem a desempenhar esta operação saberiam de imediato se teriam de executá-la 3 ou 4 vezes, sem ser necessário esforço adicional para tal. Sabendo que reconfigurações implicam custos, atuar no sentido de evitá-las é uma oportunidade promissora e vantajosa. Apesar de, conceptualmente “totalmente flexível”, a substituição de robôs *DiFLEX* por operadores humanos não acarreta redução da flexibilidade e, além disso, a diminuição do número de tarefas a serem executadas por robôs móveis, implica redução do número de robôs DiFLEX necessários na linha e, consequentemente, redução de custos de investimento.

4.2 Aplicação da abordagem ao caso de estudo

Dada a elevada complexidade associada aos sistemas reais, a aplicação da metodologia desenvolvida e descrição dos procedimentos que esta compreende foi realizada tendo em conta algumas simplificações do caso de estudo descrito. Assim, antes de realizar a descrição dos procedimentos realizados em cada um dos passos, as abstrações consideradas serão indicadas e justificadas.

Nos passos 1 e 2 da metodologia, a descrição das componentes operadas na linha e das operações de montagem a que se referem, foram baseadas em conhecimentos gerais e referências literárias de outros casos da indústria automóvel. Um elevado esforço foi aplicado no sentido de garantir a representação fiel das operações realizadas na fábrica real.

4.2.1 Aplicação do Passo 1

Como mencionado anteriormente, o processo de montagem empregue na fábrica é extremamente extenso, incluindo operações complexas, muito particulares e específicas. Para realizar uma análise rigorosa, seria necessário ter conhecimento de informação técnica detalhada, que não foi fornecida.

Inicialmente, realizou-se uma análise no sentido de identificar todos os produtos/componentes que são operados na linha.

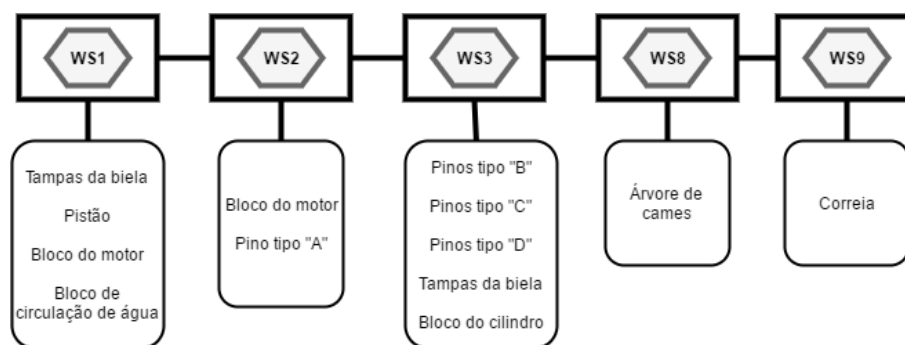


Figura 4.4: Diagrama ilustrativo dos produtos e componentes operados em cada estação de trabalho

De seguida, procedeu-se à decomposição dos produtos segundo os seus módulos e componentes.

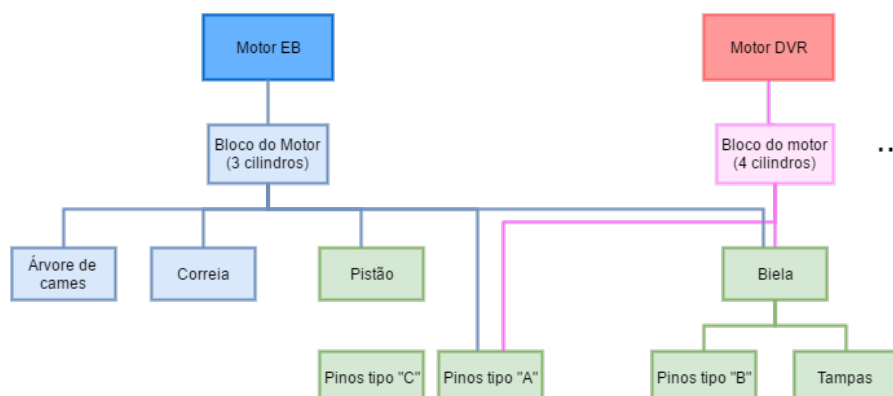


Figura 4.5: Estruturação hierárquica da família de produtos

E, por fim, cada um dos produtos identificados foi devidamente caracterizado. Devido à ausência de informação técnica específica, este procedimento foi realizado com base em conhecimentos gerais e referências disponibilizadas publicamente. A informação selecionada encontra-se ilustrada na Figura 4.6.

| Nome | Características Relevantes | |
|----------------------------------|---|--|
| | Estrutura | Dimensões |
| <i>Biela</i> | Estrutura metálica rígida; Geometria simétrica relativamente complexa por ser uma combinação de várias componentes; | Leve; ± 40 cm |
| <i>Tampa da Biela</i> | Estrutura metálica regular; Geometria simétrica simples | Leve; Pequenas dimensões |
| <i>Pistão</i> | Estrutura metálica regular; Geometria simétrica complexa por ser uma combinação de várias componentes; | Relativamente leve; Dimensões medianas |
| <i>Bloco do motor</i> | Estrutura metálica irregular; | Grandes dimensões; Muito pesado (>100 kg) |
| <i>Pinos tipo "A"</i> | Estrutura metálica revestida com material de borracha | Pequenas dimensões |
| <i>Pinos tipo "B", "C" e "D"</i> | Estrutura metálica rígida | Pequenas dimensões |
| <i>Árvore de Cames</i> | Estrutura metálica de geometria irregular. | Grande; Relativamente pesado (\pm) |
| <i>Correia</i> | Estrutura metálica deformável | Dimensões medianas; Relativamente leve |

Figura 4.6: Caracterização dos produtos da linha de montagem

4.2.2 Aplicação do Passo 2

Neste passo, o procedimento inicial correspondeu à elaboração do grafo de precedências estruturado conforme a metodologia sugere. As relações de precedência foram estabelecidas com base em informações fornecidas no caso de estudo. As operações consideradas correspondem às identificadas na descrição da proposta atual.

O procedimento referente à identificação dos graus de liberdade da linha, não será abordado uma vez que não é o foco da presente dissertação. No entanto, a sua relevância e potencial não são desconsiderados e esta análise será mencionada como oportunidade de trabalho futuro.

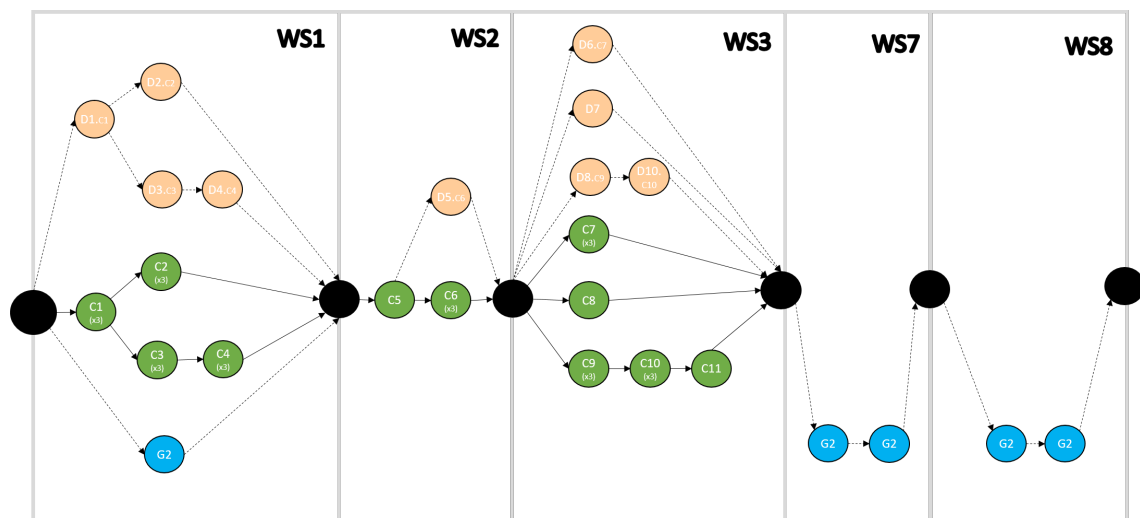


Figura 4.7: Grafo de precedências das operações do caso de estudo

4.2.3 Aplicação do Passo 3

Uma vez que este corresponde ao passo chave da metodologia, os procedimentos e análises efetuados tendem a ser mais detalhados e específicos. Por isso, é essencial clarificar a abordagem utilizada.

4.2.3.1 Descrição detalhada da abordagem adotada

Para garantir uma futura comparação de resultados eficiente, a estratégia utilizada correspondeu à realização de uma análise integral da linha, abrangente a todas as operações de montagem apresentadas no caso de estudo. Dado que, inicialmente, os resultados não são previsíveis, o objetivo foi garantir que todas as mudanças e melhorias passíveis de serem verificadas estariam incluídas no resultado final. Para tal, as considerações iniciais ditam que nenhuma das limitações apresentadas na secção (limites que impedem humanos) se aplica ao caso de estudo e que não existem restrições relacionadas com falta de disponibilidade ou inexistência de recursos.

Sabendo que a aplicação do método AHP implica a consideração de análises subjetivas, procurou-se garantir que estas fossem o mais bem fundamentadas possível. Como tal, inicialmente, realizou-se uma análise descritiva de cada uma das operações consideradas. Um elevado esforço de investigação foi empregue para que o nível de detalhe aplicado à descrição de cada uma das operações tornasse evidente a justificação das considerações efetuadas.

Para proceder à atribuição de pesos, a estratégia utilizada foi a seguinte:

1. Todos os critérios são avaliados segundo as características da operação, exceto a flexibilidade.

2. A flexibilidade, enquanto conceito chave, será utilizada para avaliar as oportunidades identificadas na secção 4.1.3. Assim, considera-se que:

- (a) Em operações comuns o requisito flexibilidade não é considerado. Tal decisão justifica-se pelo fato de este apresentar uma importância relativa consideravelmente mais baixa, se comparado com as outras classes de operações.
- (b) Em operações comuns variáveis, é atribuído ao critério flexibilidade um peso equivalente ao peso conferido ao critério selecionado como mais importante, em resultado da descrição da operação. Esta consideração justifica-se pelo fato de a grande maioria destas operações possuir um elevado peso relativamente à este critério, por ser um fator alheio às características operação e, portanto, indispensável. Ao ser considerado tão importante quanto o critério mais importante, torna-se possível analisar o impacto máximo que a necessidade de flexibilidade tem na alocação da tarefa.

4.2.3.2 Procedimento

Para facilitar análises futuras, as operações foram agrupadas por estação de trabalho, sendo de seguida apresentadas desta forma. Assim, para cada uma das operações de cada uma das estações de trabalho, em primeiro lugar, será apresentada a sua descrição detalhada e, de seguida, os resultados obtidos, correspondendo estes ao peso atribuído a cada um dos critérios e ao resultado da correspondente alocação, na matriz, do nível de automação.

As matrizes AHP correspondente à cada uma das operações encontra-se apresentada em Anexo.

Estação de trabalho 1

C₁: Separação das tampas da biela

Tipo: Operação Comum-Variável

Descrição:

Esta operação corresponde à remoção das tampas da biela para possibilitar a posterior introdução do rolamento.

Os movimentos necessários correspondem a agarrar a tampa e, de seguida, levantá-la, removendo-a da superfície superior da biela. Apesar de o ato de “agarrar” implicar alguma destreza, as características do produto manipulado e o seu posicionamento não acarretam dificuldades. O movimento realizado é, maioritariamente, unidirecional, sendo, portanto, considerado simples e extremamente repetitivo. Tais considerações, aliadas ao facto de a realização da operação não necessitar de ajustes ou precisão, sugerem que a velocidade é um fator consideravelmente benéfico.

Requisitos:

- Repetitividade > Velocidade > Destreza
- Flexibilidade = Repetitividade

Resultados:

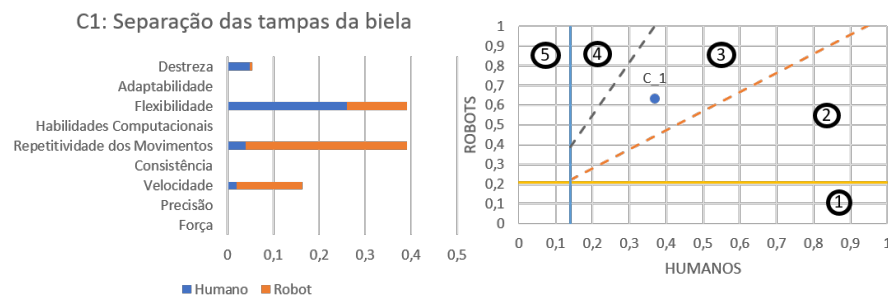


Figura 4.8: Resultados: Separação da tampa da biela

C₂: Pick & Place: tampas da biela

Tipo: Operação Comum Variável

Descrição:

Após terem sido removidas, as tampas da biela devem ser movidas até a paleta presente na estação de trabalho e, logo após, pousadas no local apropriado.

O movimento corresponde a alcançar a tampa da biela, agarrá-la, movimentá-la até ao local onde se encontra a paleta e, por fim, soltá-la no local desejado. Apesar de as características físicas da biela não suscitarem destreza na manipulação (estrutura rígida e não deformável) e as suas dimensões não dificultarem o movimento, este é decomposto em várias componentes e, portanto, necessita de alguma destreza. Por outro lado, os movimentos são repetitivos e, assim como a operação anterior, beneficiam de velocidade.

Critérios:

- Repetitividade > Destreza > Velocidade
- Flexibilidade = Repetitividade

Resultados:

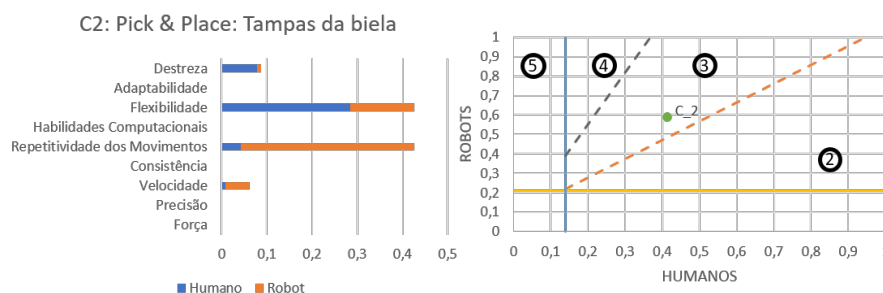


Figura 4.9: Resultados: Pick & Place: Tampas da biela

C₃: Instalação do pistão no bloco do cilindro

Tipo: Operação Comum-Variável

Descrição:

Esta operação é complexa e realizada em várias etapas.

Antes de iniciar a sua realização, é necessário garantir que a cambota está devidamente posicionada em relação ao cilindro onde o pistão será instalado, de modo a garantir que aceita a conexão da haste do pistão sem impedimentos. Feito isso, inicia-se a operação.

A primeira etapa corresponde a posicionar o pistão no orifício destinado à sua introdução no bloco do cilindro. Esta fase da operação requer alguma precisão, já que o pistão deve ser posicionado segundo uma orientação específica (perpendicular ao bloco). Garantir o alinhamento do pistão aquando da sua introdução implica a realização de constantes ajustes, sendo muito importante haver destreza na realização dos movimentos. Além disso, se realizado de forma incorreta, pode acarretar erros críticos, sendo necessário rigor e consistência.

Uma vez devidamente alinhado e posicionado, o movimento seguinte corresponde a pressionar o pistão para o interior do bloco do cilindro através da aplicação precisa de força. O pistão deve deslizar no interior do bloco até que o compressor do anel entre em contacto com a superfície do bloco. Finalmente, remove-se o compressor dos anéis e realiza-se, mais uma vez, o movimento de aplicação de força para finalizar a introdução do pistão.

No decorrer da operação, é essencial garantir que as componentes permanecem devidamente alinhadas. Ademais, se qualquer resistência à introdução do pistão ocorrer durante o procedimento, o movimento deve ser imediatamente interrompido. A adaptabilidade é um fator essencial no cumprimento deste requisito.

Requisitos:

- Adaptabilidade = Destreza = Consistência > Força > Precisão

- Flexibilidade = Adaptabilidade

Resultados:

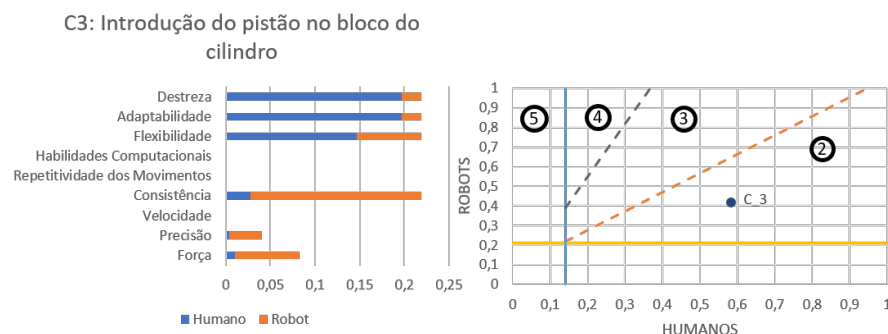


Figura 4.10: Resultados: Introdução do pistão no bloco do cilindro

G₁: Instalação do bloco de circulação de água

Tipo: Operação Específica EB

Descrição:

A instalação do bloco de circulação de água corresponde a posicioná-lo no interior do bloco do motor. Dado que, o local é de difícil acesso, a introdução da componente requer destreza de movimentos. O posicionamento deve ser feito com rigor e precisão de modo a garantir o seu correto alinhamento e possibilitar a realização eficaz das operações seguintes que dependem de tal fator.

Critérios:

- Destreza = Consistência/Rigor > Precisão

Resultados:

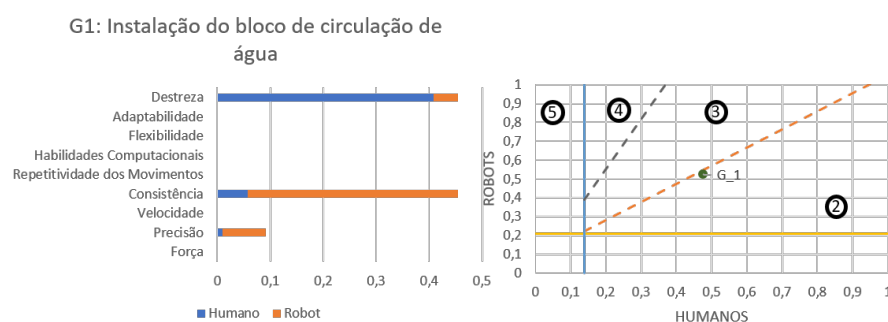


Figura 4.11: Resultados: Instalação do bloco de circulação de água

C₄: Inspeção do Pistão

Tipo: Operação Comum-Variável

Descrição:

Neste caso, a inspeção é realizada com o objetivo de detetar a presença de “folgas”. Este objetivo sugere que sensores de visão podem ser ferramentas úteis para que a tarefa seja realizada de forma mais precisa e consistente, com o propósito de evitar a propagação de possíveis erros.

Crítérios:

- Rigor/Consistência = Precisão > Habilidades Computacionais
- Flexibilidade = Consistência = Precisão

Resultados:

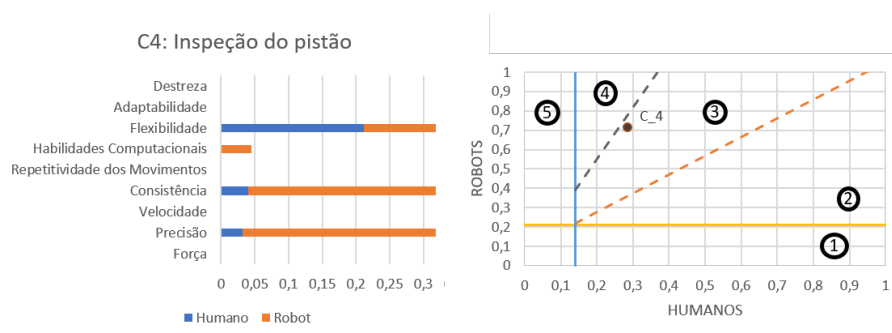


Figura 4.12: Resultados: Inspeção do pistão

Estação de Trabalho 2

C₅: Inversão do bloco do motor

Tipo: Operação Comum

Descrição:

O motor é invertido segundo uma rotação de 180°. Neste caso, as dimensões e o peso do motor são fatores com bastante influência sobre o movimento, dificultando-o, principalmente, para operadores humanos. Assim, a força é, sem dúvida, o requisito mais relevante. No entanto, dois outros fatores podem também ser considerados. Estes correspondem à destreza, dado que é necessário realizar um movimento de rotação, e à precisão, dado que a operação resulta num posicionamento específico da componente.

Requisitos:

- Força > Precisão > Destreza

Resultados

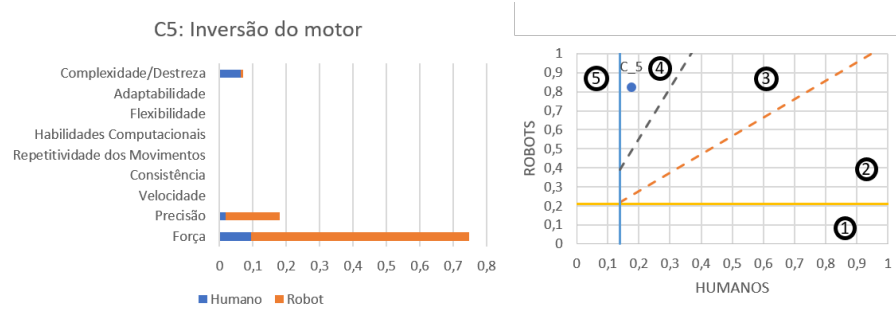


Figura 4.13: Resultados: Inversão do bloco do motor

C₆: Inserção de 2 pinos do tipo A

Tipo: Operação comum variável

Descrição:

Tipicamente, operações deste tipo caracterizam-se como simples e repetitivas, sendo, portanto, úteis que sejam realizadas com velocidade. No entanto, neste caso, a componente operada tem influências diretas nos requisitos da operação. Dado que, estes pinos se encontram revestidos por um material de borracha, acabam por oferecer resistência à realização da inserção. Logo, pode ser necessário aplicar movimentos rotativos para ajustar o encaixe dos mesmo, o que requer destreza. Neste caso considera-se que a destreza é essencial para a realização da operação, ao contrário da velocidade, por exemplo, que é apenas considerada benéfica.

Requisitos:

- Destreza > Repetitividade > Velocidade
- Flexibilidade = Destreza

Resultados:

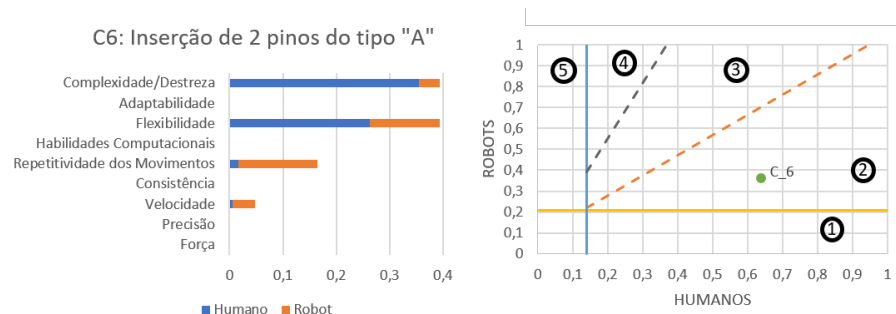


Figura 4.14: Resultados: Inserção de 2 pinos tipo "A"

Estação de Trabalho 3

C₇: Inserção de 2 pinos do tipo B

Tipo: Operação Comum Variável

Descrição:

Esta operação é de execução simples e repetitiva, sendo, por isto, útil que seja realizada com rapidez.

- Requisitos: Velocidade = Repetitividade
- Flexibilidade = Velocidade = Repetitividade

Resultados:

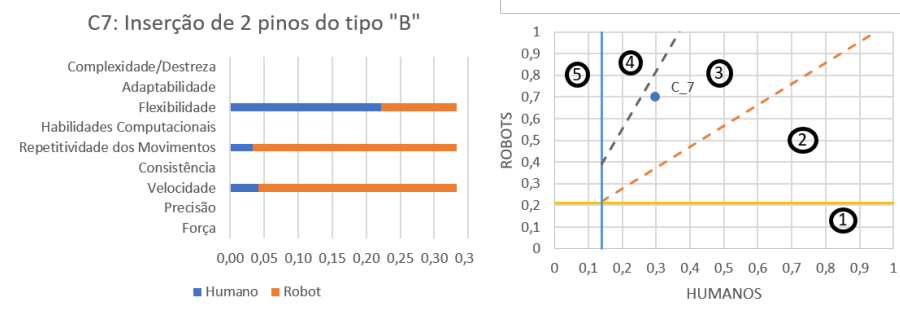


Figura 4.15: Resultados: Inserção de 2 pinos tipo "B"

C₈: Inserção de 2 pinos do tipo C

Tipo: Operação Comum

Descrição:

Esta operação é análoga a anterior e possui os mesmos requisitos em termos de movimentos. Contudo, por ser uma operação comum não necessita de flexibilidade do agente operador.

Requisitos:

- Velocidade = Repetitividade

Resultados:

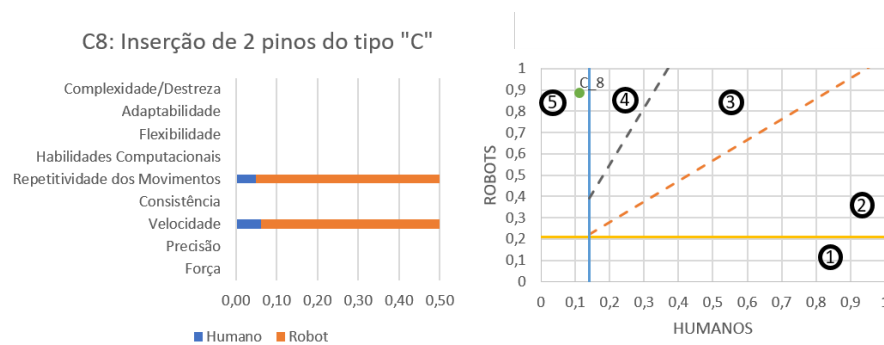


Figura 4.16: Resultados: Inserção de 2 pinos tipo "C"

D₇: Inserção de 2 pinos do tipo D*Tipo:* Específica DVR*Descrição:*Esta operação é análoga a operação C₈, possuindo os mesmos requisitos.*Requisitos:*

- Velocidade = Repetitividade

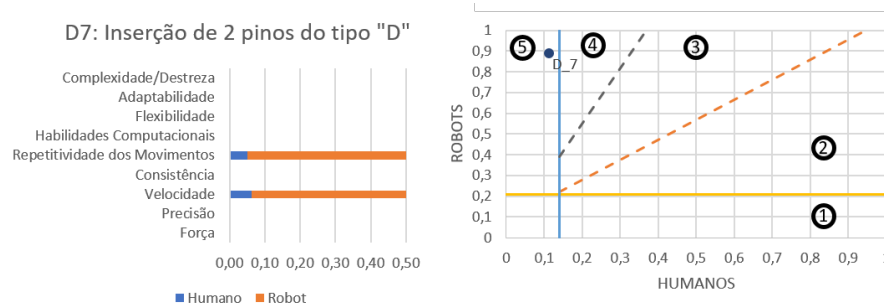
Resultados:

Figura 4.17: Resultado da alocação de tarefas: Inserção de 2 pinos tipo "D"

C₉: Aspiração das tampas da biela*Tipo:* Operação comum variável*Descrição:*

Esta operação corresponde à remoção de resíduos e impurezas do componente, devendo ser realizada com rigor. Embora este apresente uma superfície plana, sem ranhuras ou irregularidades, esta operação implica que os movimentos englobem todos os ângulos

da peça, sendo necessário alguma destreza de movimentos. A vista disto, é um movimento relativamente simples que requer velocidade, sendo também beneficiado pela utilização de uma ferramenta de aspiração eficiente considerada, neste caso, uma habilidade computacional.

Requisitos:

- Rigor = Habilidades Computacionais » Velocidade > Destreza
- Flexibilidade = Rigor = Habilidades Computacionais

Resultados:

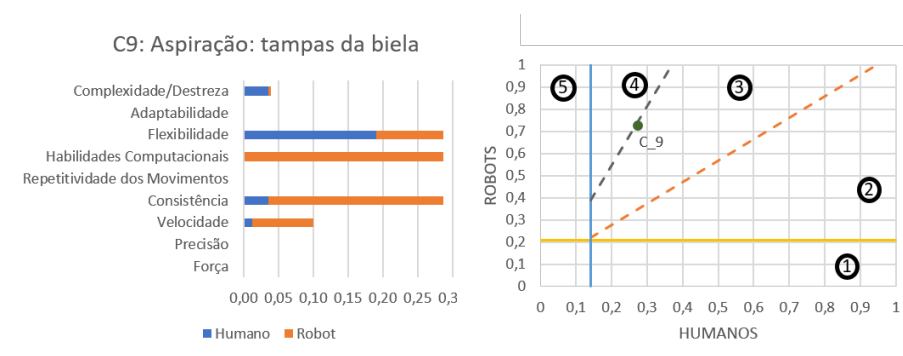


Figura 4.18: Resultado da alocação de tarefas: Aspiração das tampas da biela

D₉: Aspiração do bloco do motor

Tipo: Operação específica DVR

Descrição:

Apesar de similar à operação C₉, em termos de função, esta apresenta diferenças significativas em termos de requisitos, devido à natureza da componente manipulada. Neste caso, o bloco do cilindro apresenta uma superfície irregular com ranhuras. De modo a realizar a operação de forma eficiente, é necessário efetuar movimentos variados para garantir a aspiração dos locais de difícil acesso. Tais movimentos requerem destreza e são ajustados conforme a quantidade de impurezas verificadas. Além destes requisitos particulares, os requisitos considerados na operação C₉ também devem ser notados aqui. Assim, esta operação beneficia de velocidade, deve ser executada de forma rigorosa e consistente, e requer a utilização de uma ferramenta apropriada.

Requisitos:

- Destreza = Adaptabilidade = Habilidades computacionais = Rigor/Consistência > Velocidade

Resultados:

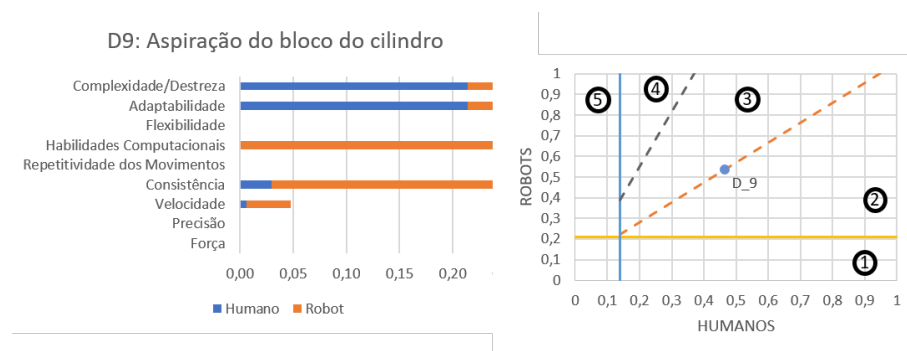


Figura 4.19: Resultados: Aspiração do bloco do motor

C₁₀: Leitura do Código de barras (*DataMatrix*) da biela

Tipo: Operação comum variável

Descrição:

Esta operação corresponde à leitura do código de barras “*DataMatrix*” presente na biela. Dada a sua natureza, necessita, obrigatoriamente, de habilidades computacionais específicas. Esta operação não carece de movimentos, é repetitiva e beneficia de velocidade.

Se a posição variasse do motor variasse, seria preciso considerar a necessidade de adaptabilidade. No entanto, como o motor encontra-se sempre numa posição fixa, tal situação não se verifica.

Requisitos:

- Habilidades computacionais > repetitividade > velocidade
- Flexibilidade = Habilidades Computacionais

Resultados:

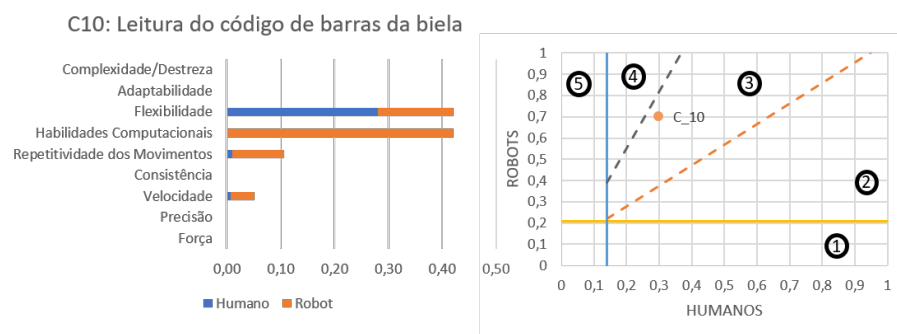


Figura 4.20: Resultados: Leitura do Código de barras da biela

C₁₁: Inspeção do bloco do motor

Tipo: Operação comum

Descrição:

Inspeção para verificar a presença de danos. A adaptabilidade, aqui, é extremamente essencial. Identificar danos é uma tarefa subjetiva, já que existe uma infinidade de variações possíveis. A consistência e o rigor são também requisitos muito importantes. A precisão na detecção de erros também é necessária. Uma vez que é uma tarefa cansativa, dispor de velocidade e habilidades computacionais que auxiliem na sua execução, apesar de não ser essencial, pode ser benéfico.

Requisitos:

- Adaptabilidade > Consistência > Precisão > Velocidade

Resultados:

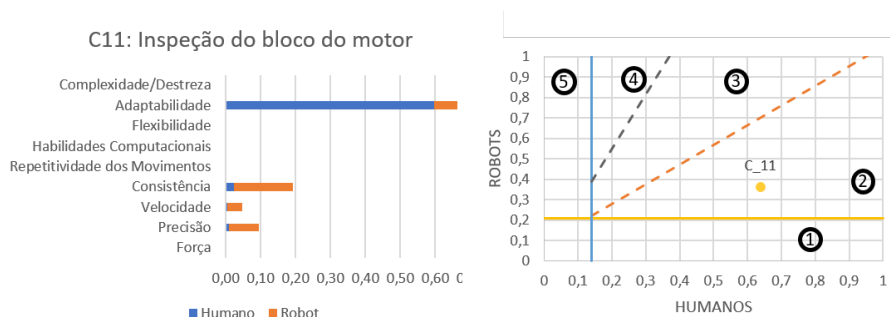


Figura 4.21: Resultados: Inspeção do bloco do motor

Estação de Trabalho 8

G₂: Pick & Place: Árvore de Cames

Tipo: Operação Específica EB

Descrição:

Esta operação é similar à operação C₂. No entanto, requer algumas considerações distintas. Por um lado, a componente manipulada é mais pesada e mais suscetível à danos, implicando o emprego de força e destreza na manipulação. Por outro lado, esta deve ser posicionada de forma específica, o que requer precisão.

Requisitos: Repetitividade > Destreza = Precisão > Velocidade = Força

Resultados

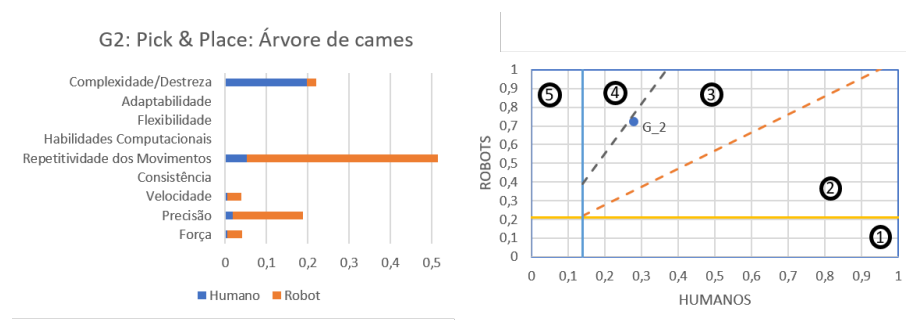


Figura 4.22: Resultados: Pick & Place: Árvore de Cames

G₃: Instalação da Árvore de Cames

Tipo: Operação Específica EB

Esta operação corresponde a inserir, cuidadosamente, a árvore de cames no bloco do cilindro deslizando-a para o seu interior. O fato de o orifício onde a componente será introduzida ser estreito, implica a necessidade de destreza na realização da operação. Além disto, é essencial garantir o correto alinhamento da árvore de cames durante a sua introdução, logo, a operação necessita também de precisão.

Requisitos: Destreza > Precisão

Resultados

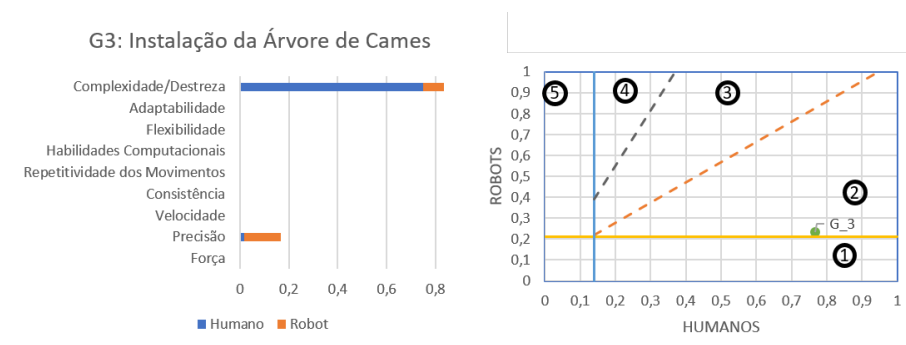


Figura 4.23: Resultados: Instalação da Árvore de Cames

Estação de Trabalho 8

G₄: Instalação da correia

Tipo: Operação Específica EB

Descrição:

Neste caso em especial, as características da componente operada definem, absolutamente, os requisitos com maior importância. Dado que a correia é deformável, o seu posicionamento adequado requer elevados níveis de destreza e adaptabilidade.

Requisitos: Destreza > Adaptabilidade

Resultados

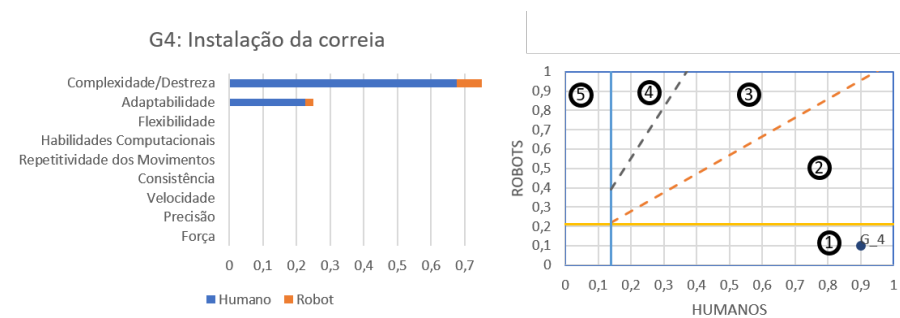


Figura 4.24: Resultados: Instalação da Correia

G₅: Aparafusamento de 8 parafusos da Árvore de Cames

Tipo: Operação Específica EB

Descrição:

Esta corresponde a uma operação típica de aparafusamento. O fato de serem 8 parafusos motiva a que seja utilizada uma ferramenta que torne a tarefa mais rápida e a repetitividade menos acentuada. Não obstante, dado que é necessário aplicar um torque específico, considera-se a necessidade de precisão. Este requisito é muito importante, já que parafusos mal ajustados implicam elevada probabilidade de ocorrência de futuros problemas no motor. Este fato leva a considerar a importância do rigor na execução desta operação.

Requisitos: Precisão = Consistência = Repetitividade = Velocidade

Resultados

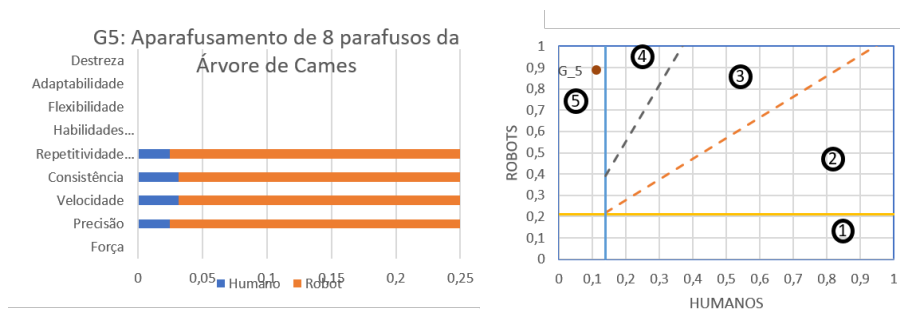


Figura 4.25: Resultados: Aparafusamento de 8 parafusos da Árvore de Cames

Nível de Automação das estações de trabalho

Estação de trabalho 1

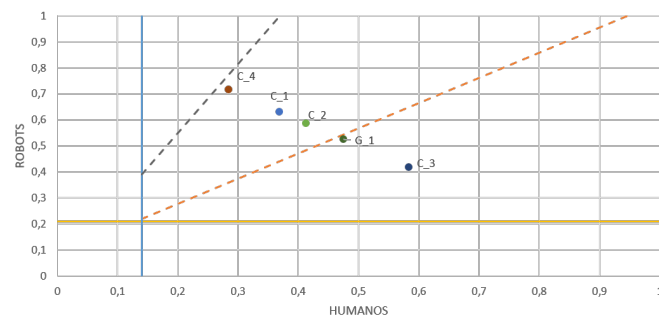


Figura 4.26: Nível de Automação das tarefas da estação de trabalho

Estação de trabalho 2

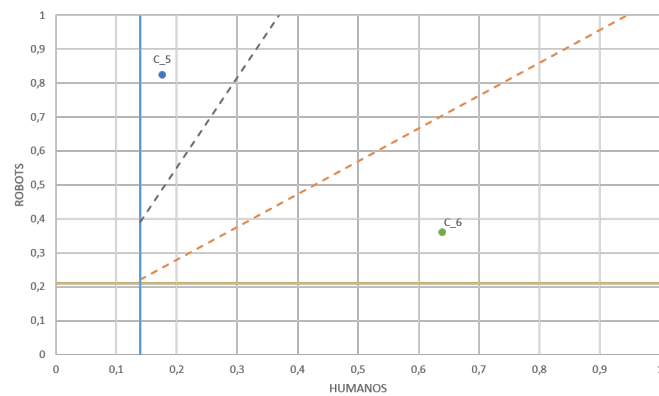


Figura 4.27: Nível de Automação das tarefas da estação de trabalho 2

Estação de trabalho 3

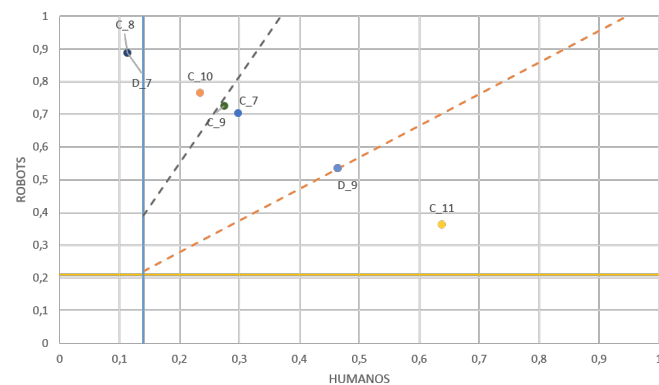


Figura 4.28: Nível de Automação das tarefas da estação de trabalho 3

Estações de trabalho 8 e 9

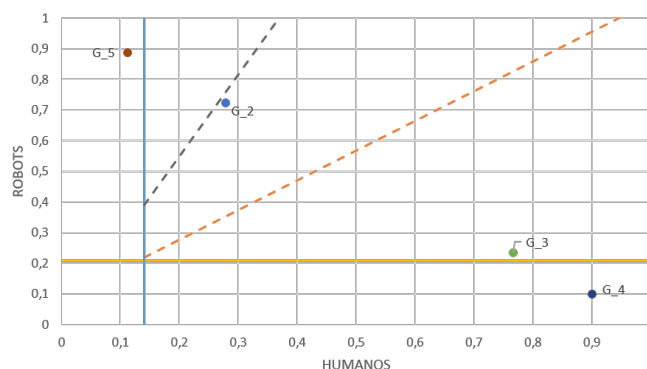


Figura 4.29: Nível de Automação das tarefas das estações de trabalho 8 e 9

Analisando estes resultados é possível constatar que em todas as estações de trabalho os resultados sugerem emprego de cooperação. Sendo as tarefas realizadas segundo os diferentes níveis, as estações de trabalho apresentam-se como híbridas. Dado que a linha é constituída por 4 estações de trabalho híbridas, que empregam operações manuais e automáticas, esta é considerada semi-automática. Assim, é possível afirmar que os resultados vão de encontro com o pressuposto indicado por [57], que garante que a performance ótima do sistema é alcançada com recurso à mão de obra cooperativa numa linha de montagem semi-automática.

4.3 Conclusões

Após realizar esta análise, torna-se possível concluir que a atribuição de pesos aos requisitos das operações é uma questão longe de trivial e que, grande parte das vezes, rejeita qualquer tipo de linearidade ou possibilidade de generalização. Tal conclusão é evidenciada ao comparar resultados de operações similares que originaram prioridades, alocações e níveis de automação diferentes. Por exemplo, as operações de inspeção do pistão e inspeção do bloco do motor, apesar de partirem do mesmo princípio apresentam objetivos completamente diferentes, que, consequentemente, sugerem resultados diferentes. Enquanto um deles, determina a utilização de um robô (nível 3) a outra favorece a utilização de mão de obra manual (nível 2). Por outro lado, em ambas as operações verifica-se a oportunidade de beneficiar de cooperação.

Além das características da operação, as características do produto operado revelaram-se também um factor com grande influência sobre a alocação. As operações de inserção de pinos e aspiração são outros exemplos que enfatizam esta constatação.

Em relação a flexibilidade, pode-se concluir que a sua necessidade acarreta diferentes consequências na decisão do nível de automação. Dado que esta fundamenta-se, a partir sua definição, em contrariar a utilização de máquinas e favorecer a utilização de humanos,

a alocação dependerá da importância atribuída aos requisitos que beneficiam as máquinas. Se estes tiverem um peso muito elevado, a necessidade de flexibilidade não será suficiente para alterar o nível de maneira a que altere o tipo de mão de obra, por outro lado, se os pesos forem mais equilibrados, utilizar um humano provavelmente será a solução mais eficaz.

Por fim, a afirmação elaborada na secção 3.3.3.1, que dita que em geral, no caso dos humanos, a limitação do desempenho está diretamente relacionada com as suas limitações físicas e, no caso das máquinas, assenta na necessidade de apresentar capacidades humanas que não podem ser replicadas, é demonstrada. De facto a grande maioria das operações resultaram numa alocação cooperativa, aquelas que não se encontram incluídas neste grupo confirmam a constatação anterior. A operação "inversão do motor", que ultrapassa as capacidades humanas em termos de força, e a operação "aparafusar 8 parafusos", que limitam a capacidade humana em termos de velocidade, resultaram numa alocação totalmente automática. Além disso, a operação "instalação da correia", que limita a máquina em termos de destreza e capacidade de manipulação, originou uma alocação totalmente manual.

A grande quantidade de operações alocadas em níveis cooperativos, indica a necessidade de unir as características individuais de cada tipo de recurso em prol da obtenção do melhor desempenho para o sistema.

Capítulo 5

Simulação e Análise de resultados

5.1 Introdução

Recorrer a técnicas de simulação é uma abordagem muito útil quando o objetivo é analisar, e avaliar com rigor, as implicações que a implementação real de um sistema concetualizado poderá acarretar. Tal fato deve-se, fundamentalmente, à capacidade que esta ferramenta apresenta de lidar com variáveis estocásticas e complexas [60].

A simulação vem sendo adotada com sucesso em inúmeros estudos e investigações inseridos no âmbito da gestão de operações. A Simulação de eventos discretos (*Discrete Event Simulation* - DES) é uma das técnicas mais utilizadas no setor. Esta é considerada uma ferramenta altamente flexível que, além de favorecer a análise e compreensão da dinâmica de sistemas de produção, permite avaliar diferentes estratégias operacionais para auxiliar processos de tomada de decisão no contexto da produção [60].

5.2 Simulação

Como anteriormente referido e salientado, quando se pretende o aumento da produtividade de sistemas de produção, a estratégia mais comum passa por apostar em tecnologias de automação. Tal fato motiva a que inovações tecnológicas sejam frequentes, implicando uma aumento significativo na diversidade de máquinas e robôs disponibilizados no mercado. Posto isto, desenvolver um modelo genérico que fosse capaz de considerar todos os fatores que, para cada caso possível refletissem a referida diversidade, foi considerado impraticável.

Posto isto, o modelo foi desenvolvido com base numa compreensão generalista dos conceitos de robôs e humanos. Estes foram considerados classes invariáveis, ou seja, as características e parâmetros atribuídos à cada uma são generalizáveis a todos os elementos nela contidos. No caso dos humanos não tem em conta características individuais como idade ou género e, no caso das máquinas, não incorpora diferenças em termos de

performance ou habilidades. O único elemento do sistema diferenciado individualmente é o robô DiFLEX, caracterizado por possuir mobilidade e habilidades ilimitadas.

Uma vez que humanos e robôs diferem consideravelmente em tems de habilidades e limitações para desempenhar uma tarefa, é essencial garantir que o modelo de simulação reflita este pressuposto. Para que tal fato seja possível, quantificar estas diferenças é um requisito fundamental.

Atendendo ao facto de que a avaliação da performance se relaciona de forma direta com a medição de tempos [54], a estratégia passou por utilizar técnicas de medição capazes de quantificar as diferenças verificadas e, de seguida, traduzi-las em penalizações aplicadas ao tempo de execução das operações.

5.2.1 Requisitos de performance

Embora as diferenças de características entre humanos e robôs tenham sido úteis para efetuar a análise de tarefas apresentada no capítulo 3, para efetuar uma abordagem baseada em simulação, torna-se necessário uma análise que possibilite investigar e comparar, de forma mais detalhada, os elementos que relacionam o desempenho na realização da tarefa com os tempos de operação necessários.

Para esse fim, foi realizada um estudo baseado nas metodologia MTM e RTM [61]. Esta assenta na análise do trabalho humano através da elaboração de categorias de movimentos elementares que podem ser aplicados de forma transversal à realização de todas as tarefas industriais, como alcançar, mover, agarrar e posicionar. Desta forma, uma operação pode ser decomposta nos seus vários movimentos elementares. Para cada um dos movimentos categorizados, o método inclui tabelas que especificam o tempo necessário para a sua execução com base em parâmetros como distância, precisão, complexidade, entre outros. Consequentemente, o tempo necessário para cada movimento e o tempo estimado total da tarefa podem ser obtidos.

Como referido anteriormente, humanos e robôs diferem significativamente nas suas características e habilidades básicas, influenciando de forma direta os métodos de trabalho aplicados por cada um para a realização de uma determinada operação. Tendo em conta este fator, e com base na comparação de capacidades, [61] desenvolve uma metodologia análoga à anterior, porém direcionada aos atributos e particularidades dos robôs. Esta metodologia, designada RTM, fornece um conjunto de movimentos elementares constituintes de uma tarefa realizada por um robôs.

Ao aplicar estes dois métodos de forma comparativa, foi possível observar as diferenças em termos de métodos de trabalho quando uma tarefa é executada por um robô ou por um operador humano, que se refletem em diferenças de tempo. Os estudos mencionados foram aplicados e utilizados como base na elaboração da análise apresentada de seguida.

Alcançar

Alcançar refere-se ao ato de movimentar uma mão vazia para chegar a uma determinada posição [61]. Esta posição, normalmente, é definida pelo posicionamento de um determinado objeto, podendo ser fixa ou variável. A variação da posição final não tem grandes implicações na realização do movimento por operadores humanos, no entanto, para um robô, as diferenças são bastante significativas. No caso de o objeto estar numa posição fixa, apenas é necessário o movimento direto e pré-programado do robô, porém, caso a posição do objeto varie, o robô, além de se mover, terá de refinar o seu posicionamento através de processos de sensorização que consomem tempo. No caso de o objeto estar misturado entre outros objetos, este processo é ainda mais exaustivo e significativamente mais lento.

Mover

Mover descreve o ato de movimentar uma mão “carregada” até uma determinada posição [61].

Neste caso, as características do objeto apresentam uma grande influência na performance dos seres humanos, já que as suas limitações físicas tornam-se evidentes, correspondendo a uma condição significativamente limitadora.

Fatores como as dimensões e o peso do objeto transportado ou a necessidade de realizar o movimento de forma rigorosamente precisa acarretam um peso negativo na realização da operação e, conseqüentemente, na sua duração. Por outro lado, é possível identificar também fatores que influenciam o desempenho dos robôs. Dado que um robô possui limitações motoras, nem sempre verifica-se possível realizar um movimento contínuo, sendo necessário que se mova através de uma série de pontos intermédios antes de atingir a posição final. Quanto mais complexo for o movimento, maior o número de movimentos intermédios necessários e, por conseguinte, maior o tempo despendido.

Agarrar

Agarrar corresponde ao ato de fechar os dedos [61]. Por um lado, objetos de grandes dimensões podem dificultar a realização da operação por parte do humano, por outro lado, se o objeto for muito pequeno as limitações sensoriais e motoras dos robôs podem ser um fator penalizador. Além disso, o objeto pode estar posicionado de modo a dificultar a realização da operação por parte do robô, no caso de o objeto estar deitado contra uma superfície plana, por exemplo.

Posicionar

O ato de posicionar está relacionado com a inserção de objetos de vários graus de simetria, dificuldades de manuseio e ajustes [61].

Todos estes fatores estão relacionados e influenciam de forma negativa a performance dos robôs. Os graus de simetria dizem respeito às características do objeto. No caso de objetos deformáveis, por exemplo, a operação torna-se significativamente mais complexa, já que é necessário realizar ajustes de movimentos. Como os movimentos dos robôs são

pré-determinados, torna-se praticamente impossível satisfazer este requisito. Além disso, a precisão do posicionamento implica esforços sensoriais que, apesar de corresponder a uma limitação passível de ser ultrapassada, também acarreta penalizações em termos de tempo.

5.2.2 Correlação com a metodologia proposta

Como enfatizado no passo 3 da metodologia proposta (3.3.3), e demonstrado no passo 3 da sua aplicação ao caso de estudo (4.2.3), as características e requisitos da operação tem influência direta na performance dos recursos. A análise efetuada no capítulo 4 permite tecer conclusões mais específicas. Por um lado, tarefas como manipulação de objetos grandes e pesados, por exemplo, são desempenhadas de forma mais eficientes por robôs, enquanto, por outro lado, tarefas de montagem onde são necessárias adaptações, ajustes ou movimentos complexos são mais eficientes quando operadas por humanos. Estas características influenciam de forma direta o tempo necessário para realização das mesmas [10].

5.2.2.1 Definição dos parâmetros de penalização

Promovendo uma associação entre a análise apresentada na secção 5.2.1 e a abordagem sugerida na secção 3.3.3.1, verificou-se possível elaborar um método capaz de quantificar a influência das características e requisitos das operações no tempo necessário para realização da mesma por cada um dos tipos de recursos.

Inicialmente, realizou-se uma análise comparativa no sentido de beneficiar das possíveis similaridades entre métodos. O objetivo é utilizar os pesos atribuídos aos critérios em resultado da aplicação da metodologia, para calcular a intensidade das penalizações temporais que os movimentos elementares acarretam quando executados pelos diferentes recursos.

O procedimento inicial foi evidenciar os fatores que influenciam a realização dos movimentos por cada um dos recursos. De seguida, estes foram associados aos critérios definidos no passo 3 da metodologia.

Além dos parâmetros sugeridos na análise dos requisitos de performance (ReqPerformance), que influenciam a realização de determinadas classes movimentos, foram introduzidos parâmetros que influenciam de forma transversal todos os movimentos realizados independente da classe. Assim como os outros, estes foram, de seguida, associados aos critérios definidos na metodologia para definir o grau de penalização.

A imagem 5.1 ilustra o processo de associação entre as análises.

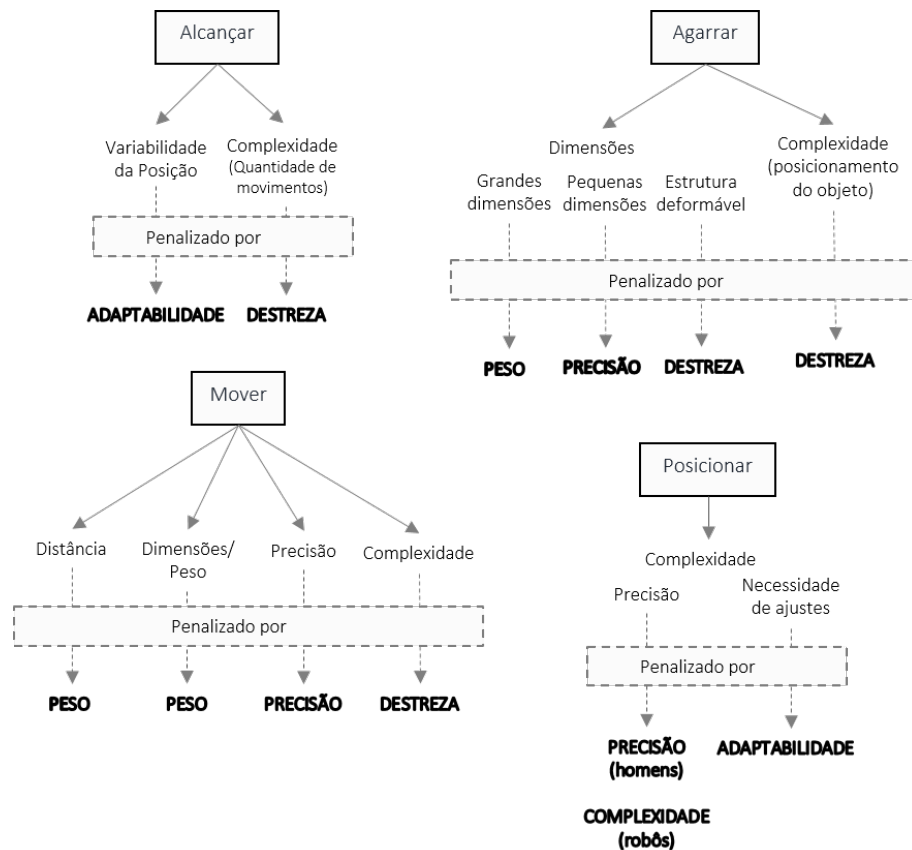


Figura 5.1: Associação entre análises para definição das penalizações

5.2.2.2 Definição dos fatores multiplicativos

Para reproduzir de forma realista a performance dos agentes ao desempenhar determinadas tarefas, as restrições referidas anteriormente foram modelizadas como fatores de penalizações. Os valores considerados para cada uma das penalizações foram calculados após uma análise apoiada nos estudos apresentados em [10, 54].

Em [10] é apresentada uma tabela que compara os tempos de realização de um conjunto de tarefas sequenciais de montagem, por robôs e por humanos:

A informação presente na tabela, evidencia a validade das constatações efetuadas até aqui, clarificando que o tempo necessário para o desempenho de uma determinada tarefa depende não só da natureza do operador, mas também das características da mesma.

Após analisar esta informação, o primeiro passo passou por considerar que os robôs são 1.5x mais rápidos a executar uma tarefa que um humano, como sugerido na análise apresentada em [54]. Este valor foi de seguida comparado com os valores apresentados na tabela 5.1. Para que o valor base pudesse corresponder aos valores da tabela, recorreu-se

Tabela 5.1: Comparação entre tempos de operação de humanos e robôs (Fonte: [10])

| <i>Tempo de operação [s]</i> | <i>Robôs</i> | <i>Humanos</i> |
|--|--------------|----------------|
| Tarefa 1: Preparar parte A | 40 | 40 |
| Tarefa 2: Recolher parte B do contentor | 20 | 80 |
| Tarefa 3: Mover B para A | 20 | 120 |
| Tarefa 4: Posicionamento preciso de B | 60 | 30 |
| Tarefa 5: Montar partes A e B para formar parte AB | 60 | 30 |
| Tarefa 6: Mover parte AB para parte C | 20 | 20 |
| Tempo total de operação | 220 | 320 |

à utilização de fatores multiplicativos de penalizações. Assim, tendo em conta as características de cada uma das operações e os valores apresentados na tabela 5.1, estas foram calculadas de modo a serem compatíveis com as diferenças temporais verificadas.

Para efetuar a análise das tarefas apresentadas na tabela 5.1, alguns pressupostos foram estabelecidos com base em [25]:

- A parte B é considerada pesada;
- A distância percorrida ao transportar B até ao local de A é considerável;
- O processo de montagem que origina AB é complexo e envolve diversos movimentos;

Nas tabelas seguintes são apresentadas as penalizações para cada uma das categorias de movimentos, os fatores multiplicativos considerados para cada uma das penalizações e o agente onde devem ser aplicadas.

Aos fatores que impedem a realização da operação por parte de algum dos recursos, como a manipulação de objetos muito pesados, por um humano, ou de objetos deformáveis, por um robô, foram atribuídas penalizações muito grandes de modo a indicar a impossibilidade de operar.

O valor das penalizações é calculado através da multiplicação entre o tempo base definido para a operação, o fator apresentado na Figura 5.2 e o peso resultante da avaliação da relevância dos critérios (análise AHP). Para cada componente que influencie a operação, o procedimento anterior é realizado. De seguida, todos os valores são somados entre si e somados ao tempo base da operação.

5.2.3 Aplicação ao caso de estudo

Como mencionado anteriormente, o procedimento descrito foi elaborado com o objetivo de possibilitar a obtenção de valores necessários de serem introduzidos nos parâmetros da simulação. Após ter sido desenvolvido, este foi aplicado ao caso de estudo.

| | Alcançar | | Mover | | | |
|---------------|------------------|---------------------|-----------|----------------|----------|----------------------------|
| | Variabilidade da | Complexidade | Distância | Dimensões/Peso | Precisão | Complexidade |
| | | (Procura e Seleção) | | | | (Quantidade de Movimentos) |
| Humano | | | 2 | 10 | 4 | |
| Robot | 2 | 4 | | | | 4 |
| | Adaptabilidade | Destreza | Peso | Peso | Precisão | Destreza |

| | Agarrar | | | |
|---------------|-----------|----------|-----------|----------------------------|
| | Dimensões | | | Complexidade |
| | Grandes | Pequenas | Estrutura | (Posicionamento do objeto) |
| Humano | 3 | | | |
| Robot | | 4 | 20 | 4 |
| | Peso | Precisão | Destreza | Destreza |

| | Posicionar | |
|---------------|---------------------------|--------------------------|
| | Complexidade | |
| | (Precisão) | (Necessidade de Ajustes) |
| Humano | 4 | |
| Robot | | 8 |
| | [H]Precisão / [R]Destreza | Adaptabilidade |

| | Multi-Tasking | Fadiga | Consistência | Subjetividade |
|---------------|---------------|----------------|--------------|----------------|
| Humano | 8 | 4 | 6 | 6 |
| Robot | | | | |
| | Velocidade | Repetitividade | Consistência | Adaptabilidade |

Figura 5.2: Fatores de penalização definidos

A informação relativa aos tempos base das operações foi fornecida pela empresa, sendo portanto, considerada fidedigna. Assim, para cada uma das operações os pesos atribuídos aos critérios e associados aos movimentos elementares foram traduzidos em penalizações para um ou ambos os recursos.

A imagem 5.3 ilustra os valores antes e após aplicação das penalizações. A análise integral encontra-se apresentada no Anexo G.

5.2.4 Modelo de simulação desenvolvido

O modelo de simulação foi desenvolvido e implementado com o recurso ao software de simulação SIMIO, uma ferramenta considerada completa e eficaz para realizar simulações de eventos discretos.

A programação implementada neste software é do tipo programação orientada a objetos, onde cada componente do sistema é representada por uma classe específica de objetos.

| ID | Operação | Takt Time [s] | Após Penalização | |
|-----|--|---------------|------------------|-------|
| | | | Humano | Robot |
| C1 | Separação das tampas da biela (x3) | 3,0 | 4,7 | 3,0 |
| C2 | Pick & Place: tampas da biela (x3) | 3,0 | 4,1 | 3,4 |
| C3 | Instalação do Pistão no bloco do cilindro (x3) | 12,0 | 12,6 | 22,5 |
| G1 | Instalação do bloco de circulação de água | 4,8 | 4,8 | 6,3 |
| C4 | Inspeção do Pistão (Controlo de visão) (x3) | 1,8 | 2,5 | 1,8 |
| C5 | Inversão do Motor | 5,0 | 13,7 | 5,0 |
| C6 | Inserção de 2 pinos tipo A | 2,8 | 3,2 | 4,6 |
| C7 | Inserção 2 pinos tipo B | 1,8 | 2,2 | 1,8 |
| C8 | Inserção de 1 pinos do tipo C | 1,8 | 2,3 | 1,8 |
| D7 | Inserção de 1 pinos do tipo "D" | 1,8 | 2,3 | 1,8 |
| C9 | Aspiração: tampas da biela (x3) | 3,0 | 3,2 | 3,1 |
| D9 | Aspiração: Bloco do cilindro | 7,2 | 7,2 | 12,0 |
| C10 | Leitura do Código de barras "DataMatrix reading" na biela (x3) | 3,0 | 3,3 | 3,0 |
| C11 | Inspeção do Bloco do Motor | 5,0 | 5,1 | 7,7 |
| G2 | Pick & Place: Árvore de Cames | 5 | 6,7 | 6,1 |
| G3 | Instalação da "arvore de Cames" no bloco do cilindro | 14 | 14,0 | 20,7 |
| G4 | Instalação da "correia" | 9 | 9,0 | 39,9 |
| G5 | Aparafusar engrenagens da Arvore de Cames | 10 | 16,2 | 10,0 |

Figura 5.3: Tempos de operação antes e após penalização

Dado que se pretende que o modelo ilustre de forma realista a linha de montagem abordada no caso de estudo, diversos objetos de diversas categorias foram criados, sendo, de seguida, especificados.

5.2.4.1 Objetos

Entidades: As entidades representam os produtos operados na linha. Cada entidade contém um nome e características específicas, assim, duas entidades foram criadas para representar os motores a diesel e a gasolina.

Source: A *source* é o objeto que promove a criação das entidades. No modelo implementado, as entidades são criadas segundo parâmetros estabelecidos pelo utilizador, incorporados nas tabelas de estruturação de dados. Estes indicam a percentagem de cada um dos tipos de motor lançadas no decorrer de um ciclo de produção. Tendo em conta a proporção estabelecida, as entidades são criadas de forma aleatória.

Server: Os *servers* representam os objetos que processam as entidades, correspondendo, neste caso, às estações de trabalho da linha. Cada servidor admite informações específicas, que incluem o tempo de processamento e a sequência de operações executadas em cada um deles. Neste caso, considerou-se que não existem buffers de entrada nem de saída, assim, caso um servidor encontre-se impedido de avançar, o fluxo de operação da linha é interrompido até que esta situação deixe de se verificar.

O modelo implementado inclui 5 objetos deste tipo, correspondendo às 5 estações de trabalho consideradas no caso de estudo. Cada um dos servidores contém informação sobre o conjunto de operações que a estação de trabalho comporta. Sendo a linha que se pretende simular uma linha de montagem sequencial, o modelo foi implementado de modo a que os dois tipos de motores passem, obrigatoriamente, em todas as estações de trabalho, incluindo os casos em que as operações executadas correspondem a operações específicas de um tipo de motor, como é o caso das estações 4 e 5. A regra de sequenciamento definida para entrada dos produtos é sempre a mesma, e corresponde a FIFO (*First in First Out*). Esta dita que os produtos são operados por ordem de chegada à estação.

Paths: Estes são objetos tem como função estabelecer a ligação entre os outros objetos incluídos no modelo, definindo a rota de produção ao longo dos servidores (estações de trabalho).

Sink: Este objeto é responsável por “destruir” as entidades que se apresentam na sua entrada. Tal conceito indica quantas das entidades lançadas pela fonte chegaram ao fim do processo estabelecido no modelo.

5.2.4.2 Estrutura de dados

A estrutura de dados é a parte mais relevante da implementação de um modelo, já que é o elemento que reflete as suas particularidades. Para incorporar de forma apropriada todas os pormenores do problema em questão, verificou-se necessária a criação de uma estrutura de dados específica. Os parâmetros envolvidos na sua elaboração e implementação podem ser representados, fundamentalmente, através do seguinte esquema:

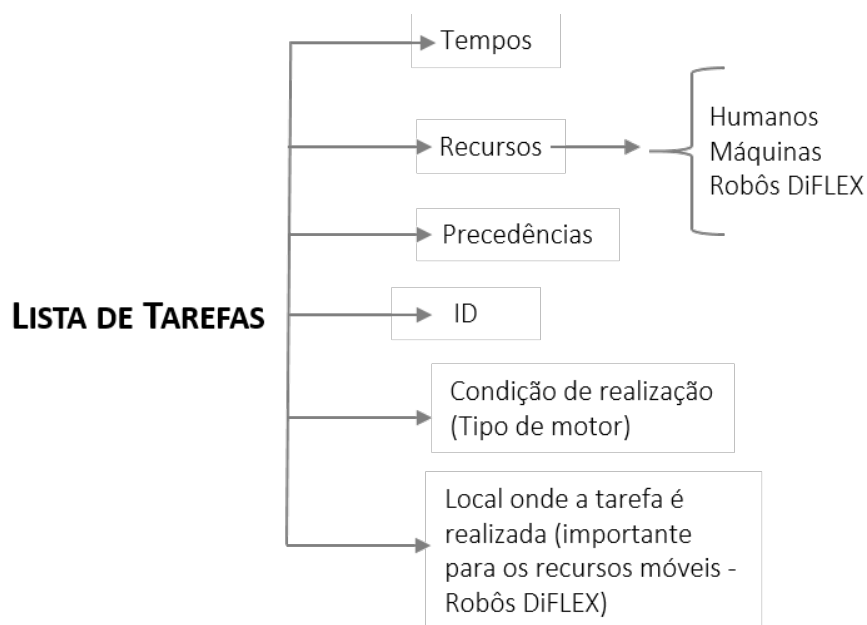


Figura 5.4: Esquematização da estrutura de dados utilizada no modelo de simulação

A análise do esquema apresentado, torna evidente o facto de que a tabela correspondente a lista de operações é a componente chave da estrutura de dados. Esta contém informação sobre todos os parâmetros relevantes do modelo. Através da alteração destes parâmetros, os diferentes cenários são construídos e implementados.

Parâmetros

Os parâmetros do modelo foram definidos a partir dos estudos e análises efetuadas ao longo da presente investigação.

Sequência de operações: A sequência de operações foi definida segundo a informação apresentada na secção 4.1.2.

Precedências: As precedências entre as operações são definidas de acordo com a análise efetuada na secção 4.2.2.

Recursos: Os recursos correspondem às alternativas apresentadas na secção 4.1.2, ou seja, máquinas, humanos e robôs DiFLEX.

Tempo de processamento: O tempo de processamento de cada uma das operações é definido de acordo com o recurso alocado, conforme ilustrado na Figura 5.2.

Condição de realização: A condição de realização indica para que tipo de motor a tarefa é realizada. Este parâmetro foi definido a partir da informação presente na secção 4.1.2.

Local de Realização: Este parâmetro é utilizado para definir as solicitações feitas aos recursos móveis (Robôs DiFLEX).

5.2.4.3 Processos

Os processos são utilizados para definir determinadas regras e lógicas que o modelo deve seguir quando executado. Estes, em SIMIO, são representados como fluxogramas gráficos, sendo portanto, bastante intuitivos. A sua construção dispensa a utilização de quaisquer outros tipos de linguagem programação.

Os processos utilizados na elaboração do modelo foram divididos em três categorias, alusivas às suas finalidades no contexto da aplicação. Estes serão apresentados de seguida.

Lead Time

Os processos incluídos nesta categoria são utilizados para medição do *Lead time* do processo. Dois processos foram criados. Um deles é responsável por iniciar a contagem do tempo quando o ciclo de produção é iniciado, e o outro é responsável por calcular o tempo dispendido entre o início da contagem e o término do ciclo de produção.

ScalableRobot1

Estes processos foram definidos para gerir a alocação dos robôs *DiFLEX* nas estações de trabalho, de forma a garantir que o número de robôs a operar numa estação de trabalho não excede o número máximo definido. Três processos foram criados nesta categoria. O primeiro é utilizado para indicar que um robô encontra-se alocado a uma estação de trabalho. O segundo é utilizado para comparar o número de robôs alocados num determinado instante com o número máximo de robôs definido. E, por fim, o terceiro é utilizado para indicar que um robô deixou uma estação de trabalho.

ScalableRobot1 Add-On Processes Esta categoria resume-se a um único processo. Este é utilizado para fazer a contagem do número de reconfigurações efetuadas no decorrer do ciclo de produção.

WS

O processo incluído nesta categoria é utilizado para obter, a partir da estrutura de dados, a informação referente ao número máximo de robôs definido para cada uma das estações de trabalho.

5.2.5 Abordagens e Resultados

Para avaliar os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia ao caso de estudo (Capítulo 4), seis cenários de comparação foram utilizados para realizar duas abordagens distintas.

5.2.5.1 Abordagem 1

A primeira foi realizada, unicamente, com o objetivo de comprovar a influência da alocação de recursos em processos complexos de montagem, evidenciando as consequências que as tomadas de decisão inapropriadas podem vir a trazer para a performance do

sistema. Para tal, a simulação foi utilizada como uma análise comparativa, considerando 3 cenários simplificados. Tendo em conta o elevado grau de abstração, os resultados são ilustrativos e utilizados apenas como prova de conceito.

Apesar de fazerem uso da informação fornecida no caso de estudo, como sequenciamento de tarefas e tempos de ciclo, o conceito de robôs *DIFLEX* não é utilizado nesta abordagem.

Cenário 1:

Este cenário corresponde à utilização exclusiva de humanos em todas as operações da linha de montagem, conforme ilustrado na figura 5.5.

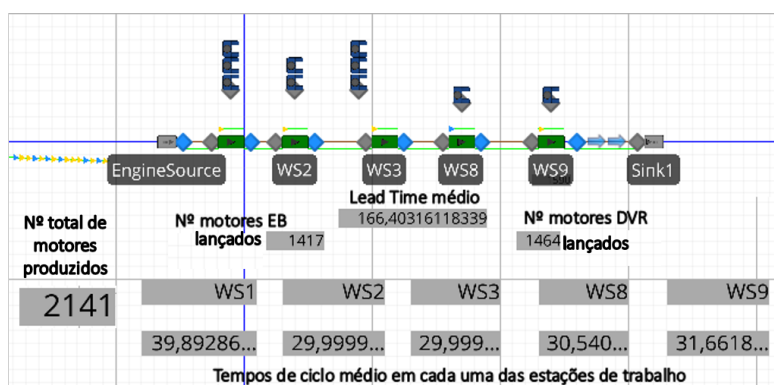


Figura 5.5: Ilustração do cenário 1 utilizado no modelo de simulação

Cenário 2: Neste cenário a linha de montagem representada é integralmente automatizada, ou seja, todas as operações são executadas por máquinas. A figura 5.6 ilustra a linha implementada segundo os requisitos deste cenário.

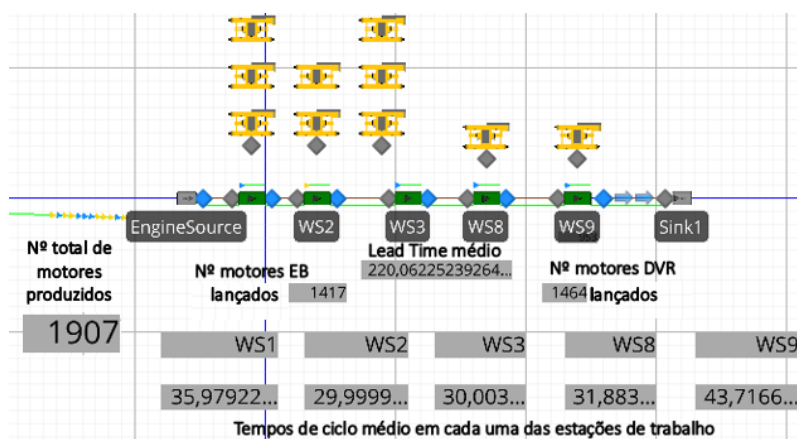


Figura 5.6: Ilustração do cenário 2 utilizado no modelo de simulação

Cenário 3:

Este cenário ilustra a realização de um processo de tomada decisão eficiente em relação à alocação dos recursos. Os recursos foram alocados de acordo com os resultados apresentados na secção 4.2.3. A linha representada agrega os conceitos de linha semi-automática e estações de trabalho cooperativas, conforme ilustrado na figura 5.7.

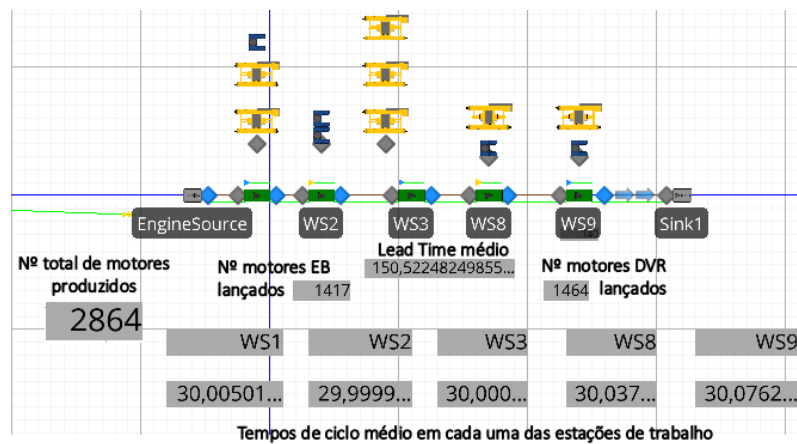


Figura 5.7: Ilustração do cenário 3 utilizado no modelo de simulação

Além das diferenças gráficas, a implementação prática dos três cenários referidos diferencia-se apenas na determinação dos tempos de operação das tarefas, já que estes dependem diretamente do recurso utilizado. Os outros parâmetros do modelo mantêm-se inalterados e equivalentes. Como referido anteriormente, em nenhum dos casos o robô *DiFLEX* é considerado.

Os resultados da simulação foram analisados em função do *Lead Time* médio, tempos de ciclo médios e número de motores produzidos em cada um dos cenários.

Para avaliar o *Lead-Time* médio e os tempos de ciclo das estações de trabalho, procedeu-se à utilização do modelo para simular o desempenho do sistema durante um ciclo de 24 horas de trabalho. As tabelas 5.2 e 5.3 ilustram os resultados obtidos.

Tabela 5.2: Simulação da abordagem 1: Comparação do *Lead Time* médio

| | Cenário 1 | Cenário 2 | Cenário 3 |
|------------------------|-----------|-----------|-----------|
| <i>Lead Time</i> médio | 166,40 | 220,06 | 150,52 |

Tabela 5.3: Simulação da abordagem 1: Comparação dos tempos de ciclo médios

| Tempo de ciclo médio | WS1 | WS2 | WS3 | WS8 | WS9 |
|-----------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| <i>Cenário 1</i> | 39.89 | 29.99 | 29.99 | 30.54 | 31.66 |
| <i>Cenário 2</i> | 35.97 | 29.99 | 30.03 | 31.88 | 43.71 |
| <i>Cenário 2</i> | 30.00 | 29.99 | 30.00 | 30.04 | 30.07 |

Os resultados da Tabela 5.2 tornam evidente a influência da alocação de recursos na performance global do sistema.

Em relação aos outros 2 primeiros cenários, uma análise mais aprofundada pode ser realizada. O facto de o cenário 1 apresentar melhor desempenho em termos de Lead Time, porém valores menos vantajosos em termos de tempo de ciclo, demonstra que a alocação de recursos não deve ser feita de forma generalista, mas sim orientada à requisitos individuais. Os resultados do cenário 3, que apresenta uma alocação eficiente de recursos, comprovam esta afirmação. De facto, para ambos os parâmetros de avaliação este apresenta o melhor desempenho.

Se por um lado a análise comparativa dos tempos individuais das operações referentes aos diferentes recursos, torna possível considerar que uma má decisão não terá grandes consequências para o sistema já que a diferença entre os tempos nem sempre é significativa, por outro lado, os resultados apresentados na simulação evidenciam a dimensão das consequências provocadas por uma série de más decisões. Estas tornam-se ainda mais evidentes se refletidas em termos de custos.

A simulação realizada para comparar a capacidade de produção foi realizada para um ciclo de trabalho de 8 horas. A tabela seguinte ilustra as diferenças alcançadas em termos de números de motores produzidos.

Tabela 5.4: Simulação da abordagem 1: Comparação do número de motores produzidos

| | Cenário 1 | Cenário 2 | Cenário 3 |
|---------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| <i>Nº de motores produzidos</i> | 726 | 643 | 949 |

Como é possível verificar, a estratégia relacionada com o nível de automação empregue poderá resultar em diferenças significativas em termos de produtividade. Analisando os diferentes cenários, é possível concluir que a opção de produção totalmente manual (consequentemente com menor custo de implementação, mas maior custo de operação) apresenta uma produção de 726 motores, sendo que a opção puramente automatizada

(com maior custo de implementação, mas menor custo de operação) apresenta uma produção de 643 motores (89% da opção manual). O cenário 3 evidencia, conforme verificado, uma estratégia baseada na cooperação e otimização de capacidades, que se reflete no aumento da produção, correspondente a 949 motores. Tal valor é bastante expressivo, já que representa 131% da produção manual e 148% da produção automática. A escolha da estratégia de produção não poderá ser tomada de forma linear, existindo outros fatores que a influenciam (fiabilidade de produção, custo de produção, conformidade e requisitos necessários), no entanto estes valores poderão atuar como mais um importante fator de decisão.

5.2.5.2 Abordagem 2

A segunda abordagem foi elaborada com o objetivo de evidenciar as vantagens da aplicação da metodologia desenvolvida ao caso de estudo. Para tal, a análise efetuada correspondeu a comparação das performances relativas à proposta fornecida no caso de estudo e à solução apresentada na secção 4.2.3. Os cenários utilizados foram os seguintes:

Cenário 4:

Este cenário representa a proposta inicial apresentada no caso de estudo. Como referido na secção 4.1.2, a proposta assenta na utilização de mão-de-obra automática para realização de todas as tarefas comuns, e de robôs *DiFLEX* para realização de todas as tarefas específicas de cada um dos motores.

Cenário 5:

Este cenário corresponde à aplicação dos resultados obtidos na secção 4.2.3 apenas nas operações comuns. Ou seja, os robôs *DiFLEX* permanecem como recurso exclusivo para operações específicas.

Cenário 6:

Por fim, este último cenário corresponde a aplicação dos resultados obtidos na secção 4.2.3 em todas as operações da linha, explorando as oportunidades delineadas na secção 4.1.3. Assim, os robôs *DiFLEX* são alocados apenas para realizar operações específicas que tenham sido classificadas como preferencialmente automáticas, ou seja, com nível de automação entre 3, 4 e 5.

A Figura 5.8 ilustra o movimento dos robôs *DiFLEX* no modelo de simulação.

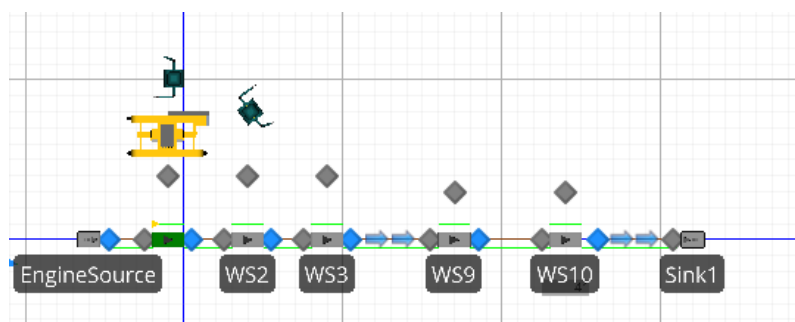


Figura 5.8: Ilustração do movimento dos robôs DiFLEX na linha de montagem

Diversas análises foram realizadas. Para comparar o desempenho dos sistemas e o impacto das alterações sugeridas, 4 indicadores de desempenho foram utilizados:

- Número de Reconfigurações
- Número mínimo de Robôs *DiFLEX* para alcançar uma determinada produção
- *Lead Time* médio
- Produtividade

5.2.5.3 Resultados

Número de reconfigurações e Lead-Time médio

| 200 motores/1 dia de Trabalho | | | | | | |
|-------------------------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
| Nº ROBOTS | Cenário 4 | | Cenário 5 | | Cenário 6 | |
| | Nº Reconfigurações | Lead-Time médio | Nº Reconfigurações | Lead-Time médio | Nº Reconfigurações | Lead-Time médio |
| 50 | 250 | 206,6 | 247 | 151,5 | 237 | 151,37 |
| 25 | 250 | 206,6 | 247 | 151,5 | 237 | 151,37 |
| 10 | 250 | 206,6 | 247 | 151,5 | 237 | 151,37 |
| 8 | 250 | 206,6 | 247 | 151,5 | 237 | 151,37 |
| 6 | 533 | 230,51 | 592 | 160,8 | 376 | 151,37 |
| 5 | 642 | 241,13 | 510 | 167,5 | 481 | 161,88 |
| 4 | 653 | 244,37 | 625 | 181,8 | 481 | 166,56 |
| 3 | 633 | 252,36 | 600 | 191,78 | 559 | 182,43 |
| 2 | 571 | 276,58 | 585 | 213,09 | 606 | 197,41 |
| 1 | 598 | 441,97 | 594 | 363,60 | 608 | 263,72 |

Figura 5.9: Resultados da simulação da abordagem 2: Número de Reconfigurações e *Lead-Time* médio

Os resultados referentes aos cenários 4 e 5, demonstram que o número de reconfigurações diminui quanto mais eficiente for a alocação de tarefas. O mesmo se verifica em termos de *Lead Time* médio.

Em relação aos cenários 5 e 6, a vantagem assenta, maioritariamente, na diminuição do número de reconfigurações necessárias. Apesar de se prever que o número de reconfigurações fosse sempre inferior no cenário 6, tal facto não se verificou. De facto, as ferramentas de simulação incluem diversas dinâmicas muitas vezes difíceis de prever. Na tentativa de justificar a inconsistência verificada, a hipótese formulada correspondeu à seguinte: Como existem tarefas a serem executadas em paralelo numa mesma estação de trabalho, mais que um robô pode ser solicitado, em simultâneo, para este local. No caso de haverem robôs disponíveis, este move-se de imediato para o local e uma reconfiguração é adicionada ao número total. No caso de não haverem robôs disponíveis, o pedido fica em espera. Entretanto, se o robô que estava a executar outra tarefa nesta mesma estação de trabalho ficar livre, ele realiza a operação em espera sem ser necessário efetuar movimentos, levando a que o número de reconfigurações permaneça inalterado.

As análises seguintes ilustram a relação entre o número de robôs empregue na linha e o número de motores produzidos.

| Scenario | | | Replications | | Controls | | Responses | |
|-------------------------------------|------------|----------|--------------|-----------|----------------|----------------|-----------|-----------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | Name | Status | Required | Completed | NumberOfRobots | NumberOfHumans | Leadtime | EnginesProduced |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Scenario1 | Compl... | 2 | 2 of 2 | 1 | 30 | 458,993 | 746 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Scenario2 | Compl... | 2 | 2 of 2 | 2 | 30 | 288,972 | 1294,5 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Scenario3 | Compl... | 2 | 2 of 2 | 3 | 30 | 258,989 | 1457,5 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Scenario4 | Compl... | 2 | 2 of 2 | 4 | 30 | 248,791 | 1524 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Scenario5 | Compl... | 2 | 2 of 2 | 5 | 30 | 243,578 | 1558 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Scenario6 | Compl... | 2 | 2 of 2 | 6 | 30 | 236,051 | 1614,5 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Scenario7 | Compl... | 2 | 2 of 2 | 7 | 30 | 227,554 | 1693,5 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Scenario8 | Compl... | 2 | 2 of 2 | 8 | 30 | 208,451 | 1849,5 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Scenario9 | Compl... | 2 | 2 of 2 | 9 | 30 | 208,451 | 1849,5 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Scenari... | Compl... | 2 | 2 of 2 | 10 | 30 | 208,451 | 1849,5 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Scenari... | Compl... | 2 | 2 of 2 | 11 | 30 | 208,451 | 1849,5 |

Figura 5.10: Cenário 4: Número de Robôs, *Lead-Time* médio e número de motores produzidos

| Design | | Response Results | | Pivot Grid | | Reports | | Input Analysis | |
|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------|--------------|------------|-----------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| Scenario | | | Replications | | Controls | | | Responses | |
| | <input checked="" type="checkbox"/> | Name | Status | Required | Completed | NumberOfRobots | NumberOfHumans | Leadtime | EnginesProduced |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Scenario1 | Compl... | 2 | 2 of 2 | 1 | 30 | 370,816 | 915, |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Scenario2 | Compl... | 2 | 2 of 2 | 2 | 30 | 220,555 | 166 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Scenario3 | Compl... | 2 | 2 of 2 | 3 | 30 | 184,056 | 205 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Scenario4 | Compl... | 2 | 2 of 2 | 4 | 30 | 175,187 | 220 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Scenario5 | Compl... | 2 | 2 of 2 | 5 | 30 | 165,103 | 2347, |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Scenario6 | Compl... | 2 | 2 of 2 | 6 | 30 | 158,384 | 2455, |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Scenario7 | Compl... | 2 | 2 of 2 | 7 | 30 | 156,938 | 249 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Scenario8 | Compl... | 2 | 2 of 2 | 8 | 30 | 150 | 264 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Scenario9 | Compl... | 2 | 2 of 2 | 9 | 30 | 150 | 264 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Scenari... | Compl... | 2 | 2 of 2 | 10 | 30 | 150 | 264 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Scenari... | Compl... | 2 | 2 of 2 | 11 | 30 | 150 | 264 |
| * | <input type="checkbox"/> | | | | | | | | |

Figura 5.11: Cenário 5: Número de Robôs, *Lead-Time* médio e número de motores produzidos

| Scenario | | | Replications | | Controls | | Responses | |
|-------------------------------------|------------|----------|--------------|-----------|----------------|----------------|-----------|-----------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | Name | Status | Required | Completed | NumberOfRobots | NumberOfHumans | Leadtime | EnginesProduced |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Scenario1 | Compl... | 2 | 2 of 2 | 1 | 30 | 262,205 | 1266,5 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Scenario2 | Compl... | 2 | 2 of 2 | 2 | 30 | 191,214 | 2011,5 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Scenario3 | Compl... | 2 | 2 of 2 | 3 | 30 | 179,155 | 2180 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Scenario4 | Compl... | 2 | 2 of 2 | 4 | 30 | 163,55 | 2402 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Scenario5 | Compl... | 2 | 2 of 2 | 5 | 30 | 156,815 | 2518 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Scenario6 | Compl... | 2 | 2 of 2 | 6 | 30 | 150 | 2640 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Scenario7 | Compl... | 2 | 2 of 2 | 7 | 30 | 150 | 2640 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Scenario8 | Compl... | 2 | 2 of 2 | 8 | 30 | 150 | 2640 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Scenario9 | Compl... | 2 | 2 of 2 | 9 | 30 | 150 | 2640 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Scenari... | Compl... | 2 | 2 of 2 | 10 | 30 | 150 | 2640 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Scenari... | Compl... | 2 | 2 of 2 | 11 | 30 | 150 | 2640 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | | | | | | | | |

Figura 5.12: Cenário 6: Número de Robôs, *Lead-Time* médio e número de motores produzidos

A avaliação segundo todos os indicadores de desempenho identificados, demonstram que a performance do sistema é significativamente superior no caso dos cenários 5 e 6, evidenciando as vantagens de uma alocação eficiente de tarefas e emprego de níveis de automação adequados.

Capítulo 6

Conclusão

A crescente demanda por qualidade e personalização por parte dos clientes tem aumentado, de forma significativa, a importância atribuída à necessidade de adaptabilidade e flexibilidade em sistemas de produção. Assim, a flexibilidade é, cada vez mais, vista como uma vantagem competitiva e, assim sendo, investigadores especialistas da área investem na busca e desenvolvimento de métodos para otimizar este fator. Se utilizados de forma adequada, as melhorias na eficiência operacional do sistema são notórias.

A presente dissertação concentrou-se no desenvolvimento de uma metodologia para auxiliar os gerentes e funcionários de alto nível no processo de tomada de decisão relativo à alocação de recursos e definição do nível de automação do sistema. O objetivo foi alcançado, propondo e desenvolvendo um método eficaz que produz resultados concretos, e não apenas qualitativos.

O presente trabalho passou por propor uma abordagem metodológica que fosse capaz de auxiliar e promover o aumento dos níveis de flexibilidade e adaptabilidade de sistemas de montagem implementados. A abordagem proposta baseou-se, fundamentalmente, numa análise cuidada da literatura para definição de critérios de comparação que, ao serem avaliados, fornecessem um auxílio direto no processo de tomada de decisão sobre a alocação de recursos. A metodologia permitiu desenvolver uma ferramenta cuja funcionalidade passa por determinar um planeamento eficiente para alocação de operações de montagem, utilizando, na medida mais elevada possível, as capacidades de humanos e robôs segundo uma perspetiva centrada na cooperação. É desenvolvido, ainda, um modelo de simulação orientado ao caso de estudo para avaliar a aplicabilidade da metodologia e a eficiência dos resultados obtidos. O primeiro é usado para obter o nível de automação mais apropriado para a operação, enquanto o segundo aplica uma análise de performance para avaliar a solução obtida anteriormente.

A maioria das operações do âmbito de sistemas de produção pode ser analisada utilizando a abordagem proposta. O modelo de decisão foi elaborado de modo a ser generalizado e adaptado para a maioria das situações. Assim, sabendo que os sistemas de mon-

tagem envolvem decisões que não podem ser tomadas de forma linear, existindo diversos fatores que a influenciam (fiabilidade de produção, custo de produção, conformidade e requisitos necessários), espera-se que a ferramenta desenvolvida forneça resultados satisfatórios na resolução de problemas relacionados com níveis de automação ineficientes e inapropriados e necessidade de introdução de flexibilidade .

6.1 Trabalho Futuro

O facto de os resultados obtidos terem sido satisfatórios sugere oportunidades promissoras de trabalhos futuros.

Dado que o objetivo era apenas uma prova de conceito, inúmeras generalizações e abstrações foram consideradas. Ter em conta características reais dos recursos de uma empresa poderia acarretar uma solução com elevado potencial associado. Realizar análises mais específicas, com requisitos mais rigorosos tornaria os resultados obtidos mais fiéis a aplicações reais. O desenvolvimento de uma aplicação orientada ao cliente, que fornecesse uma interface interativa onde, com recurso a uma base de dados específica, os clientes pudessem escolher a operação que pretende alocar, os requisitos que esta pressupõe e os recursos disponíveis como solução, despertaria o interesse dos clientes mais exigentes.

Além disso, a metodologia proposta introduz passos que não são completamente explorados. Os passos 1 e 2 da metodologia descrita no Capítulo 3 poderiam ser explorados com foco na modularização do sistema. O passo 2, em específico, pode acarretar grandes oportunidades de melhoria se associado ao passo 3. O estudo dos graus de liberdade poderiam ser explorados ampliando a alocação de tarefas também a questões relacionadas com reagrupamento de operações e reconfigurações de *layout*. Explorar as diferentes maneiras de modularizar a linha segundo a alocação de tarefas é uma oportunidade promissora para a otimização da flexibilidade e adaptabilidade do sistema.

Os efeitos da alocação de tarefas apenas foram analisados em termos de tempos de execução de tarefas. Uma boa oportunidade de ampliar os benefícios dos resultados seria encontrar índices concretos para avaliar diferentes parâmetros como a qualidade do trabalho, necessidade de investimentos e custos de mão-de-obra.

A simulação não teve em conta questões de variabilidade ou comportamento humanos, portanto, explorar estas questões com foco na engenharia de fatores humanos seria também uma boa proposta.

Anexo A

Pesos dos Recursos

Matrizes Normalizadas

| Força | Humano | Robot |
|--------|--------|-------------|
| Humano | 1 | 0,142857143 |
| Robot | 7 | 1 |

| Precisão | Humano | Robot |
|----------|--------|-------------|
| Humano | 1 | 0,111111111 |
| Robot | 9 | 1 |

| Velocidade | Humano | Robot |
|------------|--------|-------------|
| Humano | 1 | 0,142857143 |
| Robot | 7 | 1 |

| Consistência | Humano | Robot |
|--------------|--------|-------------|
| Humano | 1 | 0,142857143 |
| Robot | 7 | 1 |

| Repetitividade | Humano | Robot |
|----------------|--------|-------------|
| Humano | 1 | 0,111111111 |
| Robot | 9 | 1 |

| Habilidades | Humano | Robot |
|-------------|--------|-------------|
| Humano | 1 | 0,111111111 |
| Robot | 9 | 1 |

| Flexibilidade | Humano | Robot |
|---------------|--------|-------|
| Humano | 1 | 2 |
| Robot | 0,5 | 1 |

| Adaptabilidade | Humano | Robot |
|----------------|-------------|-------|
| Humano | 1 | 9 |
| Robot | 0,111111111 | 1 |

| Complexidade/ | Humano | Robot |
|---------------|-------------|-------|
| Humano | 1 | 9 |
| Robot | 0,111111111 | 1 |

| Força | Humano | Robot | Peso |
|--------|--------|-------|-------|
| Humano | 0,125 | 0,125 | 0,125 |
| Robot | 0,875 | 0,875 | 0,875 |

| Precisão | Humano | Robot | Peso |
|----------|--------|-------|------|
| Humano | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Robot | 0,9 | 0,9 | 0,9 |

| Velocidade | Humano | Robot | Peso |
|------------|--------|-------|-------|
| Humano | 0,125 | 0,125 | 0,125 |
| Robot | 0,875 | 0,875 | 0,875 |

| Consistência | Humano | Robot | Peso |
|--------------|--------|-------|-------|
| Humano | 0,125 | 0,125 | 0,125 |
| Robot | 0,875 | 0,875 | 0,875 |

| Repetitividade | Humano | Robot | Peso |
|----------------|--------|-------|------|
| Humano | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Robot | 0,9 | 0,9 | 0,9 |

| Habilidades | Humano | Robot | Peso |
|-------------|--------|-------|------|
| Humano | 0,1 | 0,1 | 0 |
| Robot | 0,9 | 0,9 | 1 |

| Flexibilidade | Humano | Robot | Peso |
|---------------|-------------|-------------|-------------|
| Humano | 0,666666667 | 0,666666667 | 0,666666667 |
| Robot | 0,333333333 | 0,333333333 | 0,333333333 |

| Adaptabilidade | Humano | Robot | Peso |
|----------------|--------|-------|------|
| Humano | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| Robot | 0,1 | 0,1 | 0,1 |

| Complexidade/ | Humano | Robot | Peso |
|---------------|--------|-------|------|
| Humano | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| Robot | 0,1 | 0,1 | 0,1 |

Anexo B

Matrizes AHP: Limites

| LoA_1-2 | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
|----------------------|-------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| 1 Força | 1.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.333 | 0.333 |
| 0 Precisão | 0.000 | 1.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 0 Velocidade | 0.000 | 0.000 | 1.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 0 Consistência | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 0 Repetitividade dos | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 0 Habilidades | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 0 Flexibilidade | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.000 | 0.000 | 0.000 |
| 0 Adaptabilidade | 3.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.000 | 1.000 |
| 1 Destreza | 3.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.000 | 1.000 |
| Total Colunas | 7.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 2.333 | 2.333 |
| Número de Critérios | | | | | | | | | |
| Robots | | | | | Humanos | | | | |

| Teste de Consistência | |
|-------------------------------|-------|
| Matriz_Pesos | |
| Força | 0.143 |
| Precisão | 0.000 |
| Velocidade | 0.000 |
| Consistência | 0.000 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0.000 |
| Habilidades Computacionais | 0.000 |
| Flexibilidade | 0.000 |
| Adaptabilidade | 0.429 |
| Destreza | 0.429 |

Divisão de matrizes = 3,000
IC= 0,000
IC/IA = 0,000

| LoA_1-2 | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
|--------------------|-------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| Força | 0.143 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.143 | 0.143 |
| Precisão | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Velocidade | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Consistência | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Repetitividade dos | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Habilidades | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Flexibilidade | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Adaptabilidade | 0.429 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.429 | 0.429 |
| Destreza | 0.429 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.429 | 0.429 |

| LoA_1-2 | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
|----------|--------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| Peso | 0.143 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.429 | 0.429 |
| Peso (%) | 14.286 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 42.857 | 42.857 |

| LoA_1-2 | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
|----------|--------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| Peso | 0.143 | 0.429 | 0.429 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.333 | 33.333 |
| Peso (%) | 14.286 | 42.857 | 42.857 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 33.333 | 3333.333 |

| LoA_1-2 | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza | TOTAL |
|---------|-------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|-------------|
| Humano | 0.018 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.386 | 0.386 | 0.789285714 |
| Robot | 0.125 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.043 | 0.043 | 0.210714286 |



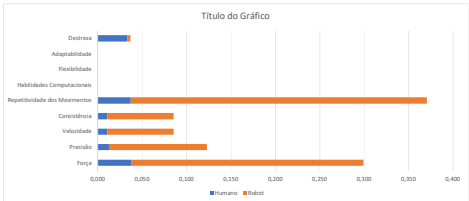
| LoA_4-5 | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
|------------------------|-------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| 1 Força | 1.000 | 1.000 | 5.000 | 5.000 | 1.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 7.000 |
| 0 Precisão | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.200 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 3.000 |
| 1 Velocidade | 0.200 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.200 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.000 |
| 1 Consistência | 0.200 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 0.200 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 3.000 |
| 0 Repetitividade dos | 1.000 | 5.000 | 5.000 | 5.000 | 1.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 7.000 |
| 0 Habilidades | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 0 Flexibilidade | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.000 | 0.000 | 0.000 |
| 0 Adaptabilidade | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.000 | 0.000 |
| 3 Destreza/Dificuldade | 0.143 | 0.333 | 0.333 | 0.333 | 0.143 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1.000 |
| Total Colunas | 3.543 | 9.333 | 13.333 | 13.333 | 2.743 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 24.000 |
| Número de Critérios | | | | | | | | | |
| Robots | | | | | Humanos | | | | |

| LoA_4-5 | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
|--------------------|-------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| Força | 0.282 | 0.107 | 0.375 | 0.375 | 0.365 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.292 |
| Precisão | 0.282 | 0.107 | 0.075 | 0.075 | 0.073 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.125 |
| Velocidade | 0.056 | 0.107 | 0.075 | 0.075 | 0.073 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.125 |
| Consistência | 0.056 | 0.107 | 0.075 | 0.075 | 0.073 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.125 |
| Repetitividade dos | 0.282 | 0.536 | 0.375 | 0.375 | 0.365 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.292 |
| Habilidades | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Flexibilidade | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Adaptabilidade | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Destreza | 0.040 | 0.036 | 0.025 | 0.025 | 0.021 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.041 |

| LoA_4-5 | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
|----------|--------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| Peso | 0.299 | 0.123 | 0.085 | 0.085 | 0.371 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.037 |
| Peso (%) | 29.928 | 12.289 | 8.525 | 8.525 | 37.070 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 3.663 |

| LoA_4-5 | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
|----------|--------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| Peso | 0.299 | 0.123 | 0.085 | 0.085 | 0.371 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.037 |
| Peso (%) | 29.928 | 12.289 | 8.525 | 8.525 | 37.070 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 3.663 |

| LoA_4-5 | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza | TOTAL |
|---------|-------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|-------------|
| Humano | 0.037 | 0.012 | 0.011 | 0.011 | 0.037 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.033 | 0.141049387 |
| Robot | 0.262 | 0.111 | 0.075 | 0.075 | 0.334 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.004 | 0.858950613 |



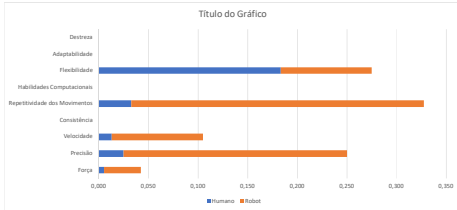
| LoA_3-4 | Força | Precisão | Velocidade | Consistência/Rigor na Execução | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
|-----------------------|-------|----------|------------|--------------------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| Força | 1,000 | 0,000 | 1,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,200 | 0,000 | 0,000 |
| Precisão | 0,000 | 1,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Velocidade | 1,000 | 0,000 | 1,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,200 | 0,000 | 0,000 |
| Consistência/Rigor na | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 1,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Repetitividade dos | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 1,000 | 0,000 | 2,000 | 0,000 | 0,000 |
| Habilidades | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 1,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Flexibilidade | 5,000 | 0,000 | 5,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 1,000 | 0,000 | 0,000 |
| Adaptabilidade | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 1,000 | 0,000 |
| Destreza/Dificuldade | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 1,000 |
| Total Colunas | 0,000 | 1,000 | 0,000 | 0,000 | 2,000 | 0,000 | 3,400 | 0,000 | 0,000 |
| Número de Critérios | 4,000 | | | Robots | | | Humanos | | |

| MATRIZ AHP NORMALIZADA | | | | | | | | | |
|------------------------|-------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| LoA_3-4 | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
| Força | 0,000 | 0,000 | 0,111 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,059 | 0,000 | 0,000 |
| Precisão | 0,000 | 1,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Velocidade | 0,000 | 0,000 | 0,111 | 0,000 | 0,250 | 0,000 | 0,059 | 0,000 | 0,000 |
| Consistência | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Repetitividade dos | 0,000 | 0,000 | 0,222 | 0,000 | 0,500 | 0,000 | 0,588 | 0,000 | 0,000 |
| Habilidades | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Flexibilidade | 0,000 | 0,000 | 0,556 | 0,000 | 0,250 | 0,000 | 0,294 | 0,000 | 0,000 |
| Adaptabilidade | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Destreza | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |

| PESO DOS CRITÉRIOS [AHP] | | | | | | | | | |
|--------------------------|-------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| LoA_3-4 | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
| Peso | 0,042 | 0,250 | 0,105 | 0,000 | 0,328 | 0,000 | 0,275 | 0,000 | 0,000 |
| Peso (%) | 4,248 | 25,000 | 10,498 | 0,000 | 32,761 | 0,000 | 27,492 | 0,000 | 0,000 |

| PESO DOS CRITÉRIOS APÓS PENALIZAÇÕES | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| LoA_3-4 | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
| Peso | 0,057 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,333 | 33,333 |
| Peso (%) | 5,664 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 33,333 | 3333,333 |

| PESO DAS ALOCAÇÕES | | | | | | | | | | |
|--------------------|-------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|------------|
| LoA_3-4 | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza | TOTAL |
| Humano | 0,005 | 0,025 | 0,013 | 0,000 | 0,033 | 0,000 | 0,183 | 0,000 | 0,000 | 0,25947372 |
| Robot | 0,037 | 0,225 | 0,092 | 0,000 | 0,295 | 0,000 | 0,092 | 0,000 | 0,000 | 0,74052628 |



Divisão de matrizes = 4,213
IC= 0,071
IC/IA = 0,122

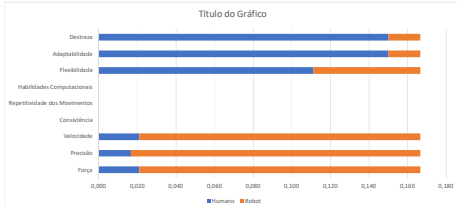
| LoA_2-3 | Força | Precisão | Velocidade | Consistência/Rigor na Execução | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
|-----------------------|-------|----------|------------|--------------------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| Força | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| Precisão | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| Velocidade | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| Consistência/Rigor na | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 1,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Repetitividade dos | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 1,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Habilidades | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 1,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Flexibilidade | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| Adaptabilidade | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| Destreza/Dificuldade | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| Total Colunas | 6,000 | 6,000 | 6,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 6,000 | 6,000 | 6,000 |
| Número de Critérios | 6,000 | | | | | | | | |

| MATRIZ AHP NORMALIZADA | | | | | | | | | |
|------------------------|-------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| LoA_2-3 | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
| Força | 0,167 | 0,167 | 0,167 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,167 | 0,167 | 0,167 |
| Precisão | 0,167 | 0,167 | 0,167 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,167 | 0,167 | 0,167 |
| Velocidade | 0,167 | 0,167 | 0,167 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,167 | 0,167 | 0,167 |
| Consistência | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Repetitividade dos | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Habilidades | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| Flexibilidade | 0,167 | 0,167 | 0,167 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,167 | 0,167 | 0,167 |
| Adaptabilidade | 0,167 | 0,167 | 0,167 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,167 | 0,167 | 0,167 |
| Destreza | 0,167 | 0,167 | 0,167 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,167 | 0,167 | 0,167 |

| PESO DOS CRITÉRIOS [AHP] | | | | | | | | | |
|--------------------------|--------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| LoA_2-3 | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
| Peso | 0,167 | 0,167 | 0,167 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,167 | 0,167 | 0,167 |
| Peso (%) | 16,667 | 16,667 | 16,667 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 16,667 | 16,667 | 16,667 |

| PESO DOS CRITÉRIOS APÓS PENALIZAÇÕES | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|--------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| LoA_2-3 | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
| Peso | 0,333 | 0,333 | 0,333 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,333 | 0,333 | 33,333 |
| Peso (%) | 33,333 | 33,333 | 33,333 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 33,333 | 3333,333 | |

| PESO DAS ALOCAÇÕES | | | | | | | | | | |
|--------------------|-------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|------------|
| LoA_2-3 | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza | TOTAL |
| Humano | 0,021 | 0,017 | 0,021 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,111 | 0,150 | 0,150 | 0,46844444 |
| Robot | 0,146 | 0,150 | 0,146 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,056 | 0,017 | 0,017 | 0,33055556 |



Divisão de matrizes = 6,000
IC= 0,000
IC/IA = 0,000

| Teste de Consistência | | |
|-------------------------------|-------|-------|
| Matriz_Pesos | | |
| Força | 0,042 | 0,202 |
| Precisão | 0,250 | 0,250 |
| Velocidade | 0,105 | 0,366 |
| Consistência | 0,000 | 0,000 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0,328 | 1,087 |
| Habilidades Computacionais | 0,000 | 0,000 |
| Flexibilidade | 0,275 | 1,176 |
| Adaptabilidade | 0,000 | 0,000 |
| Destreza | 0,000 | 0,000 |

x

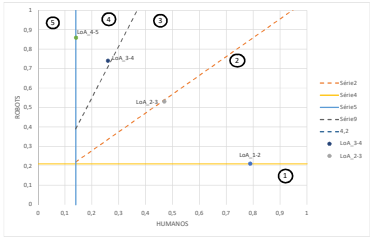
=

| Teste de Consistência | | |
|-------------------------------|-------|-------|
| Matriz_Pesos | | |
| Força | 0,167 | 1,000 |
| Precisão | 0,167 | 1,000 |
| Velocidade | 0,167 | 1,000 |
| Consistência | 0,000 | 0,000 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0,000 | 0,000 |
| Habilidades Computacionais | 0,000 | 0,000 |
| Flexibilidade | 0,167 | 1,000 |
| Adaptabilidade | 0,167 | 1,000 |
| Destreza | 0,167 | 1,000 |

x

=

| | | | | | | | | | | | |
|---|------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|
| 1 Totalmente Manual | | | | | | | | | | | |
| x | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1 |
| y | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 0,21 |
| 2 Humano + Ferramenta Automática | | | | | | | | | | | |
| x | 0,14 | 0,243333 | 0,346666 | 0,449999 | 0,553332 | 0,656665 | 0,759998 | 0,863331 | 0,966664 | 1,069997 | 1,17333 |
| y | 0,22 | 0,32 | 0,42 | 0,52 | 0,62 | 0,72 | 0,82 | 0,92 | 1,02 | 1,12 | 1,22 |
| 3 Robot de controlo programável + Intervenção Manual | | | | | | | | | | | |
| x | 0,12 | 0,22 | 0,32 | 0,42 | 0,52 | 0,62 | 0,72 | 0,82 | 0,92 | 1,02 | 1,12 |
| y | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,5 |
| 4 Robot com programa fixo + Intervenção Manual (Complexidade) | | | | | | | | | | | |
| x | 0,14 | 0,17 | 0,2 | 0,23 | 0,26 | 0,29 | 0,32 | 0,35 | 0,38 | 0,41 | 0,44 |
| y | 0,22 | 0,31 | 0,39 | 0,47 | 0,55 | 0,63 | 0,71 | 0,79 | 0,87 | 0,95 | 1,03 |
| 5 Robot Autónomo totalmente automatizado | | | | | | | | | | | |
| x | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 |
| y | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1 |



| | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 2 Humano + Ferramenta Automática | | | | | | | | | | | |
| x | 0,15 | 0,25 | 0,35 | 0,45 | 0,55 | 0,65 | 0,75 | 0,85 | 0,95 | 1,05 | 1,15 |
| y | 0,35 | 0,45 | 0,55 | 0,65 | 0,75 | 0,85 | 0,95 | 1,05 | 1,15 | 1,25 | 1,35 |
| 2 Humano + Ferramenta Automática | | | | | | | | | | | |
| x | 0,15 | 0,25 | 0,35 | 0,45 | 0,55 | 0,65 | 0,75 | 0,85 | 0,95 | 1,05 | 1,15 |
| y | -0,05 | 0,05 | 0,15 | 0,25 | 0,35 | 0,45 | 0,55 | 0,65 | 0,75 | 0,85 | 0,95 |

| | | | |
|---|------|-------|-------------|
| x | 0,12 | 0,43 | 0,103333333 |
| y | 0,22 | 0,57 | 0,116666667 |
| | | | |
| x | 0,12 | 0,316 | 0,032666667 |
| y | 0,22 | 1,6 | 0,116666667 |

Anexo C

Matrizes AHP: WS1

| Separação da tampa da biela | Força | Precisão | Velocidade | Consistência/Rigor | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Complexidade/Destreza |
|---------------------------------|-------|----------|------------|--------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-----------------------|
| 0 Força | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 Precisão | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 Velocidade | 0 | 0 | 1 | 0 | 0,33333333 | 0 | 0,33333333 | 0 | 5 |
| 0 Consistência | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 Repetitividade dos Movimentos | 0 | 0 | 3 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 7 |
| 0 Habilidades Computacionais | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 7 Flexibilidade | 0 | 0 | 3 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 7 |
| 0 Adaptabilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 3 Destreza | 0 | 0 | 0,2 | 0 | 0,142857143 | 0 | 0,2 | 0 | 1 |
| Total Colunas | 0 | 0 | 7,2 | 0 | 2,476190476 | 0 | 2,533333333 | 0 | 20 |
| Robôs | | | | | | | | | |
| Humanos | | | | | | | | | |

Número de Critérios

4

MATRIZ AHP NORMALIZADA

| Separação da tampa da biela | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Complexidade/Destreza |
|-------------------------------|-------|----------|-------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-----------------------|
| Força | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Precisão | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Velocidade | 0 | 0 | 0,138888889 | 0 | 0,134615385 | 0 | 0,131578947 | 0 | 0,25 |
| Consistência | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0 | 0 | 0,416666667 | 0 | 0,403846154 | 0 | 0,394736842 | 0 | 0,35 |
| Habilidades Computacionais | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Flexibilidade | 0 | 0 | 0,416666667 | 0 | 0,403846154 | 0 | 0,394736842 | 0 | 0,35 |
| Adaptabilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Complexidade/Destreza | 0 | 0 | 0,027777778 | 0 | 0,057692308 | 0 | 0,078947368 | 0 | 0,05 |

PESO DOS CRITÉRIOS [AHP]

| Separação da tampa da biela | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Complexidade/Destreza |
|-----------------------------|-------|----------|-------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-----------------------|
| Peso | 0 | 0 | 0,163770805 | 0 | 0,391312416 | 0 | 0,391312416 | 0 | 0,053604363 |
| Peso (%) | 0 | 0 | 16,37708052 | 0 | 39,13124157 | 0 | 39,13124157 | 0 | 5,360436347 |

PESO DOS CRITÉRIOS APÓS PENALIZAÇÕES

| Separação da tampa da biela | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Complexidade/Destreza |
|-----------------------------|-------|----------|-------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-----------------------|
| Peso | 0 | 0 | 0,053604363 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,25 | 25 |
| Peso (%) | 0 | 0 | 5,360436347 | 0 | 0 | 0 | 0 | 25 | 2500 |

PESO DAS ALOCAÇÕES

| Separação da tampa da biela | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Complexidade/Destreza | TOTAL |
|-----------------------------|-------|----------|-------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-----------------------|-------------|
| Humano | 0 | 0 | 0,020471351 | 0 | 0,039131242 | 0 | 0,260874944 | 0 | 0,048243927 | 0,368721463 |
| Robot | 0 | 0 | 0,143299455 | 0 | 0,352181174 | 0 | 0,130437472 | 0 | 0,005360436 | 0,631278537 |

| Pick & Place: tampas da biela (x3) | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Complexidade/Destreza |
|------------------------------------|-------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-----------------------|
| 0 Força | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 Precisão | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 Velocidade | 0 | 0 | 1 | 0 | 0,16666667 | 0 | 0,16666667 | 0 | 8,5 |
| 0 Consistência | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 Repetitividade dos Movimentos | 0 | 0 | 6 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 6 |
| 0 Habilidades Computacionais | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 1 Flexibilidade | 0 | 0 | 6 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 6 |
| 0 Adaptabilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 2 Destreza/Dificuldade | 0 | 0 | 2 | 0 | 0,16666667 | 0 | 0,16666667 | 0 | 1 |
| Total Colunas | 0 | 0 | 15 | 0 | 2,33333333 | 0 | 2,33333333 | 0 | 13,5 |
| Robôs | | | | | | | | | |
| Humanos | | | | | | | | | |

Número de Critérios

4

MATRIZ AHP NORMALIZADA

| Pick & Place: tampas da biela (x3) | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Complexidade/Destreza |
|------------------------------------|-------|----------|-------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-----------------------|
| Força | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Precisão | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Velocidade | 0 | 0 | 0,066666667 | 0 | 0,071428571 | 0 | 0,071428571 | 0 | 0,037037037 |
| Consistência | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0 | 0 | 0,4 | 0 | 0,428571429 | 0 | 0,428571429 | 0 | 0,444444444 |
| Habilidades Computacionais | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Flexibilidade | 0 | 0 | 0,4 | 0 | 0,428571429 | 0 | 0,428571429 | 0 | 0,444444444 |
| Adaptabilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Complexidade/Destreza | 0 | 0 | 0,133333333 | 0 | 0,071428571 | 0 | 0,071428571 | 0 | 0,074074074 |

PESO DOS CRITÉRIOS [AHP]

| Pick & Place: tampas da biela (x3) | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Complexidade/Destreza |
|------------------------------------|-------|----------|-------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-----------------------|
| Peso | 0 | 0 | 0,061640212 | 0 | 0,425396825 | 0 | 0,425396825 | 0 | 0,087566138 |
| Peso (%) | 0 | 0 | 6,164021164 | 0 | 42,53968254 | 0 | 42,53968254 | 0 | 8,756613757 |

PESO DAS ALOCAÇÕES

| Pick & Place: tampas da biela (x3) | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Complexidade/Destreza | TOTAL |
|------------------------------------|-------|----------|-------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-----------------------|-------------|
| Humano | 0 | 0 | 0,007705026 | 0 | 0,042539683 | 0 | 0,283597884 | 0 | 0,078809524 | 0,412652116 |
| Robot | 0 | 0 | 0,053935185 | 0 | 0,382857143 | 0 | 0,141798942 | 0 | 0,008756614 | 0,587347884 |

| Teste de Consistência | |
|-----------------------|-------|
| Matriz_Pesos | |
| Força | 0,000 |
| Precisão | 0,000 |
| Velocidade | 0,164 |
| Consistência | 0,000 |
| Repetitividade dos | 0,391 |
| Habilidades Comp | 0,000 |
| Flexibilidade | 0,391 |
| Adaptabilidade | 0,000 |
| Complexidade/De | 0,054 |

Divisão de matrizes =

4,193

IC=

0,064

IC/IA =

0,072

x

x

=

Divisão de matrizes =

4,062

IC=

0,021

IC/IA =

0,023

0,000

0,000

0,247

0,000

1,746

0,000

1,746

0,000

0,088

0,353

| Instalação do Pistão no bloco do cilindro (x3) | Força | Precisão | Velocidade | Consistência/Rigor na Execução | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Complexidade/Destreza |
|--|-------------|----------|------------|--------------------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-----------------------|
| 5 Força | 1 | 3 | 0 | 0,33333333 | 0 | 0 | 0,33333333 | 0,33333333 | 0,33333333 |
| 5 Precisão | 0,33333333 | 1 | 0 | 0,2 | 0 | 0 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| 0 Velocidade | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 Consistência/Rigor na Execução | 3 | 5 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 Repetitividade dos Movimentos | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 Habilidades Computacionais | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 7 Flexibilidade | 3 | 5 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 9 Adaptabilidade | 3 | 5 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 7 Destreza/Dificuldade | 3 | 5 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| Total Colunas | 13,33333333 | 24 | 0 | 4,53333333 | 0 | 0 | 4,53333333 | 4,53333333 | 4,53333333 |

Número de Critérios

6

MATRIZ AHP NORMALIZADA

| Instalação do Pistão no bloco do cilindro (x3) | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Complexidade/Destreza |
|--|-------|-------------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-----------------------|
| Força | 0,075 | 0,125 | 0 | 0,073529412 | 0 | 0 | 0,073529412 | 0,073529412 | 0,073529412 |
| Precisão | 0,025 | 0,041666667 | 0 | 0,044117647 | 0 | 0 | 0,044117647 | 0,044117647 | 0,044117647 |
| Velocidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Consistência | 0,225 | 0,20833333 | 0 | 0,220588235 | 0 | 0 | 0,220588235 | 0,220588235 | 0,220588235 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Habilidades Computacionais | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Flexibilidade | 0,225 | 0,20833333 | 0 | 0,220588235 | 0 | 0 | 0,220588235 | 0,220588235 | 0,220588235 |
| Adaptabilidade | 0,225 | 0,20833333 | 0 | 0,220588235 | 0 | 0 | 0,220588235 | 0,220588235 | 0,220588235 |
| Complexidade/Destreza | 0,225 | 0,20833333 | 0 | 0,220588235 | 0 | 0 | 0,220588235 | 0,220588235 | 0,220588235 |

PESO DOS CRITÉRIOS [AHP]

| Instalação do Pistão no bloco do cilindro (x3) | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Complexidade/Destreza |
|--|-------------|-------------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-----------------------|
| Peso | 0,082352941 | 0,04052876 | 0 | 0,219281046 | 0 | 0 | 0,219281046 | 0,219281046 | 0,219281046 |
| Peso (%) | 8,235294118 | 4,052287582 | 0 | 21,92810458 | 0 | 0 | 21,92810458 | 21,92810458 | 21,92810458 |

PESO DOS CRITÉRIOS APÓS PENALIZAÇÕES

| Instalação do Pistão no bloco do cilindro (x3) | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Complexidade/Destreza |
|--|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-----------------------|
| Peso | 0,123529412 | 0,328921569 | 0,328921569 | | 0 | 0 | 0 | 0,25 | 25 |
| Peso (%) | 12,35294118 | 32,89215686 | 32,89215686 | | 0 | 0 | 0 | 25 | 2500 |

PESO DAS ALOCAÇÕES

| Instalação do Pistão no bloco do cilindro (x3) | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Complexidade/Destreza | TOTAL |
|--|-------------|-------------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-----------------------|-------------|
| Humano | 0,010294118 | 0,004052288 | 0 | 0,027410131 | 0 | 0 | 0,146187364 | 0,197352941 | 0,197352941 | 0,582649782 |
| Robot | 0,072058824 | 0,036470588 | 0 | 0,191870915 | 0 | 0 | 0,073093682 | 0,021928105 | 0,021928105 | 0,417350218 |

| Instalação do bloco de circulação de água | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Complexidade/Destreza |
|---|-------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-----------------------|
| 0 Força | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 Precisão | 0 | 1 | 0 | 0,2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,2 |
| 0 Velocidade | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 Consistência | 0 | 5 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 0 Repetitividade dos Movimentos | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 Habilidades Computacionais | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 Flexibilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 Adaptabilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 7 Destreza/Dificuldade | 0 | 5 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Total Colunas | 0 | 11 | 0 | 2,2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2,2 |

Número de Critérios

3

MATRIZ AHP NORMALIZADA

| Instalação do bloco de circulação de água | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Complexidade/Destreza |
|---|-------|-------------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-----------------------|
| Força | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Precisão | 0 | 0,090909091 | 0 | 0,090909091 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,090909091 |
| Velocidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Consistência | 0 | 0,454545455 | 0 | 0,454545455 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,454545455 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Habilidades Computacionais | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Flexibilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Adaptabilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Complexidade/Destreza | 0 | 0,454545455 | 0 | 0,454545455 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,454545455 |

PESO DOS CRITÉRIOS [AHP]

| Instalação do bloco de circulação de água | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Complexidade/Destreza |
|---|-------|-------------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-----------------------|
| Peso | 0 | 0,090909091 | 0 | 0,454545455 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,454545455 |
| Peso (%) | 0 | 9,090909091 | 0 | 45,45454545 | 0 | 0 | 0 | 0 | 45,45454545 |

PESO DOS CRITÉRIOS APÓS PENALIZAÇÕES

| Instalação do bloco de circulação de água | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Complexidade/Destreza |
|---|-------|----------|-------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-----------------------|
| Peso | 0 | 0 | 0,340909091 | | 0 | 0 | 0 | 0,25 | 25 |
| Peso (%) | 0 | 0 | 34,09090909 | | 0 | 0 | 0 | 25 | 2500 |

PESO DAS ALOCAÇÕES

| Instalação do bloco de circulação de água | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Complexidade/Destreza | TOTAL |
|---|-------|-------------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-----------------------|-------|
| Humano | 0 | 0,009090909 | 0 | 0,056818182 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,409090909 | 0,475 |
| Robot | 0 | 0,081818182 | 0 | 0,397727273 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,045454545 | 0,525 |

| Teste de Consistência | |
|-----------------------|-------|
| Matriz_Pesos | |
| Força | 0,082 |
| Precisão | 0,041 |
| Velocidade | 0,000 |
| Consistência | 0,219 |
| Repetitividade dos | 0,000 |
| Habilidades Comp | 0,000 |
| Flexibilidade | 0,219 |
| Adaptabilidade | 0,219 |
| Complexidade/Del | 0,219 |

=

0,496
0,243
0,000
1,327
0,000
0,000
1,327
1,327
1,327

Divisão de matrizes =

6,039

IC=

0,008

IC/A =

0,006

x

x

=

0,000
0,273
0,000
1,364
0,000
0,000
0,000
0,000
0,000
1,364

Divisão de matrizes =

3,000

IC=

0,000

IC/A =

0,000

| Inspeção do Pistão (Controlo de visão) (x3) | Força | Precisão | Velocidade | Consistência/Rigor | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Complexidade/Destr eza |
|---|-------|-------------|------------|--------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|------------------------|
| 0 Força | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 Precisão | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 7 | 1 | 0 | 0 |
| 0 Velocidade | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 Consistência/Rigor | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 7 | 1 | 0 | 0 |
| 0 Repetitividade dos Movimentos | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 Habilidades Computacionais | 0 | 0,142857143 | 0 | 0,142857143 | 0 | 1 | 0,142857143 | 0 | 0 |
| 7 Flexibilidade | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 7 | 1 | 0 | 0 |
| 0 Adaptabilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 0 Destreza/Difículdade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Total Colunas | 0 | 3,142857143 | 0 | 3,142857143 | 0 | 22 | 3,142857143 | 0 | 0 |
| Número de Critérios 4 Robôs Humanos | | | | | | | | | |

| Teste de Consistência | |
|-----------------------|-------|
| Matriz_Pesos | |
| Força | 0,000 |
| Precisão | 0,318 |
| Velocidade | 0,000 |
| Consistência | 0,318 |
| Repetitividade dos | 0,000 |
| Habilidades Comp | 0,045 |
| Flexibilidade | 0,318 |
| Adaptabilidade/De | 0,000 |
| Complexidade/De | 0,000 |

x

=

0,000
1,273
0,000
1,273
0,000
0,182
1,273
0,000
0,000

| Inspeção do Pistão (Controlo de visão) (x3) | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Complexidade/Destr eza |
|---|-------|-------------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|------------------------|
| Força | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Precisão | 0 | 0,318181818 | 0 | 0,318181818 | 0 | 0,318181818 | 0,318181818 | 0 | 0 |
| Velocidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Consistência | 0 | 0,318181818 | 0 | 0,318181818 | 0 | 0,318181818 | 0,318181818 | 0 | 0 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Habilidades Computacionais | 0 | 0,045454545 | 0 | 0,045454545 | 0 | 0,045454545 | 0,045454545 | 0 | 0 |
| Flexibilidade | 0 | 0,318181818 | 0 | 0,318181818 | 0 | 0,318181818 | 0,318181818 | 0 | 0 |
| Adaptabilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Complexidade/Destreza | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Divisão de matrizes =

4,000

IC=

0,000

IC/IA =

0,000

| PESO DOS CRITÉRIOS [AHP] | | | | | | | | | |
|---|-------|-------------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|------------------------|
| Inspeção do Pistão (Controlo de visão) (x3) | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Complexidade/Destr eza |
| Peso | 0 | 0,318181818 | 0 | 0,318181818 | 0 | 0,045454545 | 0,318181818 | 0 | 0 |
| Peso (%) | 0 | 31,81818182 | 0 | 31,81818182 | 0 | 4,545454545 | 31,81818182 | 0 | 0 |

| PESO DAS ALOCAÇÕES | | | | | | | | | | |
|---|-------|-------------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|------------------------|-------------|
| Inspeção do Pistão (Controlo de visão) (x3) | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Complexidade/Destr eza | TOTAL |
| Humano | 0 | 0,031818182 | 0 | 0,039772727 | 0 | 0 | 0,212121212 | 0 | 0 | 0,283712121 |
| Robot | 0 | 0,286363636 | 0 | 0,278409091 | 0 | 0,045454545 | 0,106060606 | 0 | 0 | 0,716287879 |

Anexo D

Matrizes AHP: WS2

| Inversão do Motor | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Complexidade/Destreza |
|-------------------------------|------------|------------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-----------------------|
| Força | 1 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Precisão | 0,2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Velocidade | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Consistência | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Habilidades Computacionais | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Flexibilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Adaptabilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Destreza/Dificuldade | 0,11111111 | 0,33333333 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Total Colunas | 1,31111111 | 6,33333333 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13 |

Número de Critérios

3

MATRIZ AHP NORMALIZADA

| Inversão do Motor | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Complexidade/Destreza |
|-------------------------------|-------------|-------------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-----------------------|
| Força | 0,762711864 | 0,789473684 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,692307692 |
| Precisão | 0,152542373 | 0,157894737 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,230769231 |
| Velocidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Consistência | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Habilidades Computacionais | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Flexibilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Adaptabilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Complexidade/Destreza | 0,084745763 | 0,052631579 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,076923077 |

PESO DOS CRITÉRIOS [AHP]

| Inversão do Motor | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Complexidade/Destreza |
|-------------------|-------------|-------------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-----------------------|
| Peso | 0,748164414 | 0,180402113 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,071433473 |
| Peso (%) | 74,81644136 | 18,04021135 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7,143347286 |

PESO DAS ALOCAÇÕES

| Inversão do Motor | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Complexidade/Destreza | TOTAL |
|-------------------|-------------|-------------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-----------------------|-------------|
| Humano | 0,093520552 | 0,018040211 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,064290126 | 0,175850889 |
| Robot | 0,654643862 | 0,162361902 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,007143347 | 0,824149111 |

| Inserção de 2 pinos tipo A | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Complexidade/Destreza |
|-------------------------------|-------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-----------------------|
| Força | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Precisão | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Velocidade | 0 | 0 | 1 | 0 | 0,2 | 0 | 0,142857143 | 0 | 0,142857143 |
| Consistência | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0 | 0 | 5 | 0 | 1 | 0 | 0,333333333 | 0 | 0,333333333 |
| Habilidades Computacionais | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Flexibilidade | 0 | 0 | 7 | 0 | 3 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| Adaptabilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Destreza/Dificuldade | 0 | 0 | 7 | 0 | 3 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| Total Colunas | 0 | 0 | 20 | 0 | 7,2 | 0 | 2,476190476 | 0 | 2,476190476 |

Número de Critérios

4

MATRIZ AHP NORMALIZADA

| Inserção de 2 pinos tipo A | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Complexidade/Destreza |
|-------------------------------|-------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-----------------------|
| Força | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Precisão | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Velocidade | 0 | 0 | 0,05 | 0 | 0,027777778 | 0 | 0,057692308 | 0 | 0,057692308 |
| Consistência | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0 | 0 | 0,25 | 0 | 0,138888889 | 0 | 0,134615385 | 0 | 0,134615385 |
| Habilidades Computacionais | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Flexibilidade | 0 | 0 | 0,35 | 0 | 0,416666667 | 0 | 0,403846154 | 0 | 0,403846154 |
| Adaptabilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Complexidade/Destreza | 0 | 0 | 0,35 | 0 | 0,416666667 | 0 | 0,403846154 | 0 | 0,403846154 |

PESO DOS CRITÉRIOS [AHP]

| Inserção de 2 pinos tipo A | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Complexidade/Destreza |
|----------------------------|-------|----------|-------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-----------------------|
| Peso | 0 | 0 | 0,048290598 | 0 | 0,164529915 | 0 | 0,393589744 | 0 | 0,393589744 |
| Peso (%) | 0 | 0 | 4,829059829 | 0 | 16,45299145 | 0 | 39,35897436 | 0 | 39,35897436 |

PESO DOS CRITÉRIOS APÓS PENALIZAÇÕES

| Inserção de 2 pinos tipo A | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Complexidade/Destreza |
|----------------------------|-------|----------|-------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-----------------------|
| Peso | 0 | 0 | 0,048290598 | 0 | 0,164529915 | 0 | 0,393589744 | 0 | 0,393589744 |
| Peso (%) | 0 | 0 | 4,829059829 | 0 | 16,45299145 | 0 | 39,35897436 | 0 | 39,35897436 |

PESO DAS ALOCAÇÕES

| Inserção de 2 pinos tipo A | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Complexidade/Destreza | TOTAL |
|----------------------------|-------|----------|-------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-----------------------|-------------|
| Humano | 0 | 0 | 0,006036325 | 0 | 0,016452991 | 0 | 0,262393162 | 0 | 0,354230769 | 0,639113248 |
| Robot | 0 | 0 | 0,042254274 | 0 | 0,148076923 | 0 | 0,131196581 | 0 | 0,039358974 | 0,360886752 |

| Teste de Consistência | |
|-------------------------------|-------|
| Matriz_Pesos | |
| Força | 0,748 |
| Precisão | 0,180 |
| Velocidade | 0,000 |
| Consistência | 0,000 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0,000 |
| Habilidades Comp | 0,000 |
| Flexibilidade | 0,000 |
| Adaptabilidade | 0,000 |
| Complexidade/Destreza | 0,215 |

x

=

2,293
0,544
0,000
0,000
0,000
0,000
0,000
0,000
0,000
0,215

Divisão de matrizes =

3,029

IC=

0,015

IC/IA =

0,025

x

=

0,000
0,000
0,194
0,000
0,668
0,000
1,619
0,000
1,619

Divisão de matrizes =

4,075

IC=

0,025

IC/IA =

0,028

Anexo E

Matrizes AHP: WS3

| Inserção 2 pinos tipo B | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
|-------------------------------|-------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| 0 Força | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 Precisão | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 Velocidade | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 0 Consistência | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Habilidades Computacionais | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 5 Flexibilidade | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 Adaptabilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 0 Destreza/Dificuldade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Total Colunas | 0 | 0 | 3 | 0 | 3 | 0 | 3 | 0 | 0 |

Número de Critérios 3

MATRIZ AHP NORMALIZADA

| Inserção 2 pinos tipo B | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
|-------------------------------|-------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| Força | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Precisão | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Velocidade | 0 | 0 | 0,33333333 | 0 | 0,33333333 | 0 | 0,33333333 | 0 | 0 |
| Consistência | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0 | 0 | 0,33333333 | 0 | 0,33333333 | 0 | 0,33333333 | 0 | 0 |
| Habilidades Computacionais | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Flexibilidade | 0 | 0 | 0,33333333 | 0 | 0,33333333 | 0 | 0,33333333 | 0 | 0 |
| Adaptabilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Destreza | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

PESO DOS CRITÉRIOS [AHP]

| Inserção 2 pinos tipo B | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
|-------------------------|-------|----------|-------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| Peso | 0 | 0 | 0,33333333 | 0 | 0,33333333 | 0 | 0,33333333 | 0 | 0 |
| Peso (%) | 0 | 0 | 33,33333333 | 0 | 33,33333333 | 0 | 33,33333333 | 0 | 0 |

PESO DAS ALOCAÇÕES

| Inserção 2 pinos tipo B | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza | TOTAL |
|-------------------------|-------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|------------|
| Humano | 0 | 0 | 0,04166667 | 0 | 0,03333333 | 0 | 0,22222222 | 0 | 0 | 0,29722222 |
| Robot | 0 | 0 | 0,29166667 | 0 | 0,3 | 0 | 0,11111111 | 0 | 0 | 0,70277778 |

| Inserção de 1 pinos do tipo C | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
|-------------------------------|-------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| 0 Força | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 Precisão | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 Velocidade | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 Consistência | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 Movimentos | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Habilidades Computacionais | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 Flexibilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 Adaptabilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 0 Destreza/Dificuldade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Total Colunas | 0 | 0 | 2 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Número de Critérios 2

MATRIZ AHP NORMALIZADA

| Inserção de 1 pinos do tipo C | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
|-------------------------------|-------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| Força | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Precisão | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Velocidade | 0 | 0 | 0,5 | 0 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Consistência | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0 | 0 | 0,5 | 0 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Habilidades Computacionais | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Flexibilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Adaptabilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Destreza | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

PESO DOS CRITÉRIOS [AHP]

| Inserção de 1 pinos do tipo C | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
|-------------------------------|-------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| Peso | 0 | 0 | 0,5 | 0 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Peso (%) | 0 | 0 | 50 | 0 | 50 | 0 | 0 | 0 | 0 |

PESO DAS ALOCAÇÕES

| Inserção de 1 pinos do tipo C | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza | TOTAL |
|-------------------------------|-------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|--------|
| Humano | 0 | 0 | 0,0625 | 0 | 0,05 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,1125 |
| Robot | 0 | 0 | 0,4375 | 0 | 0,45 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,8875 |

| Inserção de 1 pinos do tipo "centring oil pump pins" | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
|--|-------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| 0 Força | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 Precisão | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 Velocidade | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 Consistência | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 Movimentos | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Habilidades Computacionais | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 Flexibilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 Adaptabilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 0 Destreza/Dificuldade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| Total Colunas | 0 | 0 | 2 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Número de Critérios 2

MATRIZ AHP NORMALIZADA

| Inserção de 1 pinos do tipo "centring oil pump pins" | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
|--|-------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| Força | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Precisão | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Velocidade | 0 | 0 | 0,5 | 0 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Consistência | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0 | 0 | 0,5 | 0 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Habilidades Computacionais | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| Teste de Consistência | |
|-------------------------------|-------|
| Matriz_Pesos | |
| Força | 0,000 |
| Precisão | 0,000 |
| Velocidade | 0,333 |
| Consistência | 0,000 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0,333 |
| Habilidades Comp | 0,000 |
| Flexibilidade | 0,333 |
| Adaptabilidade | 0,000 |
| Destreza | 0,000 |

x

= 0,000
0,000
1,000
0,000
1,000
0,000
1,000
0,000
0,000

Divisão de matrizes = 3,000
IC= 0,000
IC/IA = 0,000

| Teste de Consistência | |
|-------------------------------|-------|
| Matriz_Pesos | |
| Força | 0,000 |
| Precisão | 0,000 |
| Velocidade | 0,500 |
| Consistência | 0,000 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0,500 |
| Habilidades Comp | 0,000 |
| Flexibilidade | 0,000 |
| Adaptabilidade | 0,000 |
| Destreza | 0,000 |

x

Divisão de matrizes = 2,000
IC= 0,000
IC/IA = 0,000

| Teste de Consistência | |
|-------------------------------|-------|
| Matriz_Pesos | |
| Força | 0,000 |
| Precisão | 0,000 |
| Velocidade | 0,500 |
| Consistência | 0,000 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0,500 |
| Habilidades Comp | 0,000 |
| Flexibilidade | 0,000 |
| Adaptabilidade | 0,000 |
| Destreza | 0,000 |

x

Divisão de matrizes = 2,000
IC= 0,000
IC/IA = 0,000

| | | | | | | | | | | |
|----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Flexibilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Adaptabilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Destreza | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

PESO DOS CRITÉRIOS [AHP]

| Inserção de 1 pinos do tipo "centring oil pump pins" | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
|--|-------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| Peso | 0 | 0 | 0,5 | 0 | 0,5 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Peso (%) | 0 | 0 | 50 | 0 | 50 | 0 | 0 | 0 | 0 |

PESO DAS ALOCAÇÕES

| Inserção de 1 pinos do tipo "centring oil pump pins" | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza | TOTAL |
|--|-------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|--------|
| Humano | 0 | 0 | 0,0625 | 0 | 0,05 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,1125 |
| Robot | 0 | 0 | 0,4375 | 0 | 0,45 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,8875 |

| Aspiração: tampas da bielea (x3) | Força | Precisão | Velocidade | Consistência/Rigor | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
|----------------------------------|-------|----------|-------------|--------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| 0 Força | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 Precisão | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 Velocidade | 0 | 0 | 1 | 0,33333333 | 0 | 0,33333333 | 0,33333333 | 0 | 0 |
| 7 Consistência | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 Habilidades Computacionais | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 7 Flexibilidade | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 0 Adaptabilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 0 Destreza/Dificuldade | 0 | 0 | 0,33333333 | 0,142857143 | 0 | 0,142857143 | 0,142857143 | 0 | 0 |
| Total Colunas | 0 | 0 | 10,33333333 | 3,476190476 | 0 | 3,476190476 | 3,476190476 | 0 | 25 |
| | | | | Robôs | | | | | Humanos |

Número de Critérios

5

MATRIZ AHP NORMALIZADA

| Aspiração: tampas da bielea (x3) | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
|----------------------------------|-------|----------|-------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| Força | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Precisão | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Velocidade | 0 | 0 | 0,096774194 | 0,095890411 | 0 | 0,095890411 | 0,095890411 | 0 | 0,12 |
| Consistência | 0 | 0 | 0,290322581 | 0,287671233 | 0 | 0,287671233 | 0,287671233 | 0 | 0,28 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Habilidades Computacionais | 0 | 0 | 0,290322581 | 0,287671233 | 0 | 0,287671233 | 0,287671233 | 0 | 0,28 |
| Flexibilidade | 0 | 0 | 0,290322581 | 0,287671233 | 0 | 0,287671233 | 0,287671233 | 0 | 0,28 |
| Adaptabilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Destreza | 0 | 0 | 0,032258065 | 0,04109589 | 0 | 0,04109589 | 0,04109589 | 0 | 0,04 |

PESO DOS CRITÉRIOS [AHP]

| Aspiração: tampas da bielea (x3) | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
|----------------------------------|-------|----------|-------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-------------|
| Peso | 0 | 0 | 0,100889085 | 0,286667256 | 0 | 0,286667256 | 0,286667256 | 0 | 0,039109147 |
| Peso (%) | 0 | 0 | 10,08890853 | 28,66672559 | 0 | 28,66672559 | 28,66672559 | 0 | 3,910914715 |

PESO DAS ALOCAÇÕES

| Aspiração: tampas da bielea (x3) | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza | TOTAL |
|----------------------------------|-------|----------|-------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-------------|-------------|
| Humano | 0 | 0 | 0,012611136 | 0,035833407 | 0 | 0 | 0,191111504 | 0 | 0,035198232 | 0,274754279 |
| Robot | 0 | 0 | 0,08827795 | 0,250833849 | 0 | 0,286667256 | 0,095555752 | 0 | 0,003910915 | 0,725245721 |

| Aspiração: "Cylinder block joint face" | Força | Precisão | Velocidade | Consistência/Rigor | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
|--|-------|----------|------------|--------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| 0 Força | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 Precisão | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 Velocidade | 0 | 0 | 1 | 0,2 | 0 | 0,2 | 0 | 0,2 | 0,2 |
| 7 Consistência/Rigor | 0 | 0 | 0 | 5 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 Habilidades Computacionais | 0 | 0 | 0 | 5 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 0 Flexibilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 9 Adaptabilidade | 0 | 0 | 0 | 5 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 9 Destreza/Dificuldade | 0 | 0 | 0 | 5 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| Total Colunas | 0 | 0 | 21 | 4,2 | 0 | 4,2 | 0 | 4,2 | 4,2 |
| | | | | Robôs | | | | | Humanos |

Número de Critérios

5

MATRIZ AHP NORMALIZADA

| Aspiração: "Cylinder block joint face" | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
|--|-------|----------|-------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-------------|
| Força | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Precisão | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Velocidade | 0 | 0 | 0,047619048 | 0,047619048 | 0 | 0,047619048 | 0 | 0,047619048 | 0,047619048 |
| Consistência | 0 | 0 | 0,238095238 | 0,238095238 | 0 | 0,238095238 | 0 | 0,238095238 | 0,238095238 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Computacionais | 0 | 0 | 0,238095238 | 0,238095238 | 0 | 0,238095238 | 0 | 0,238095238 | 0,238095238 |
| Flexibilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Adaptabilidade | 0 | 0 | 0,238095238 | 0,238095238 | 0 | 0,238095238 | 0 | 0,238095238 | 0,238095238 |
| Destreza | 0 | 0 | 0,238095238 | 0,238095238 | 0 | 0,238095238 | 0 | 0,238095238 | 0,238095238 |

PESO DOS CRITÉRIOS [AHP]

| Aspiração: "Cylinder block joint face" | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
|--|-------|----------|-------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-------------|
| Peso | 0 | 0 | 0,047619048 | 0,238095238 | 0 | 0,238095238 | 0 | 0,238095238 | 0,238095238 |
| Peso (%) | 0 | 0 | 4,761904762 | 23,80952381 | 0 | 23,80952381 | 0 | 23,80952381 | 23,80952381 |

PESO DAS ALOCAÇÕES

| Aspiração: "Cylinder block joint face" | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza | TOTAL |
|--|-------|----------|-------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-------------|-------------|
| Humano | 0 | 0 | 0,005952381 | 0,029761905 | 0 | 0 | 0 | 0,214285714 | 0,214285714 | 0,464285714 |
| Robot | 0 | 0 | 0,041666667 | 0,208333333 | 0 | 0,238095238 | 0 | 0,023809524 | 0,023809524 | 0,535714286 |

| Leitura do Código de barras "DataMatrix reading" na bielea (x3) | Força | Precisão | Velocidade | Consistência/Rigor | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
|---|-------|----------|------------|--------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| 0 Força | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 Precisão | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 Velocidade | 0 | 0 | 1 | 0 | 0,33333333 | 0,142857143 | 0,142857143 | 0 | 0 |
| 0 Consistência/Rigor | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 1 | 0,2 | 0,2 | 0 |
| 9 Habilidades Computacionais | 0 | 0 | 0 | 7 | 0 | 5 | 1 | 1 | 0 |
| 7 Flexibilidade | 0 | 0 | 0 | 7 | 0 | 5 | 1 | 1 | 0 |
| 0 Adaptabilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 0 Destreza/Dificuldade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Total Colunas | 0 | 0 | 18 | 0 | 11,33333333 | 2,342857143 | 2,342857143 | 0 | 0 |
| | | | | Robôs | | | | | |

| Teste de Consistência | |
|-------------------------------|-------|
| Matriz_Pesos | |
| Força | 0,000 |
| Precisão | 0,000 |
| Velocidade | 0,101 |
| Consistência | 0,287 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0,000 |
| Habilidades Comp | 0,287 |
| Flexibilidade | 1,436 |
| Adaptabilidade | 0,000 |
| Destreza | 0,196 |

x

=

1,436

Divisão de matrizes =

5,008

IC=

0,002

IC/IA =

0,002

x

=

1,190

Divisão de matrizes =

5,000

IC=

0,000

IC/IA =

0,000

x

=

0,000

0,430

1,736

1,736

0,000

0,000

| MATRIZ AHP NORMALIZADA | | | | | | | | | |
|--|-------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| Leitura do Código de barras "DataMatrix reading" na biela (x3) | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
| Força | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Precisão | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Velocidade | 0 | 0 | 0,05555556 | 0 | 0,029411765 | 0,06097561 | 0,06097561 | 0 | 0 |
| Consistência | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0 | 0 | 0,16666667 | 0 | 0,088235294 | 0,085365854 | 0,085365854 | 0 | 0 |
| Habilidades Computacionais | 0 | 0 | 0,38888889 | 0 | 0,441176471 | 0,426829268 | 0,426829268 | 0 | 0 |
| Flexibilidade | 0 | 0 | 0,38888889 | 0 | 0,441176471 | 0,426829268 | 0,426829268 | 0 | 0 |
| Adaptabilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Destreza | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| PESO DOS CRITÉRIOS [AHP] | | | | | | | | | |
|--|-------|----------|-------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| Leitura do Código de barras "DataMatrix reading" na biela (x3) | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
| Peso | 0 | 0 | 0,051729635 | 0 | 0,106408417 | 0,420930974 | 0,420930974 | 0 | 0 |
| Peso (%) | 0 | 0 | 5,172963494 | 0 | 10,6408417 | 42,0930974 | 42,0930974 | 0 | 0 |

| PESO DOS CRITÉRIOS APÓS PENALIZAÇÕES | | | | | | | | | |
|--|-------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-------------|
| Leitura do Código de barras "DataMatrix reading" na biela (x3) | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
| Peso | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,333333333 | 33,33333333 |
| Peso (%) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 33,33333333 | 3333,333333 |

| PESO DAS ALOCAÇÕES | | | | | | | | | | |
|--|-------|---------|-------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|-------------|
| Leitura do Código de barras "DataMatrix reading" na biela (x3) | Força | Preciso | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza | TOTAL |
| Humano | 0 | 0 | 0,005466204 | 0 | 0,010640842 | 0 | 0,280620649 | 0 | 0 | 0,297772695 |
| Robot | 0 | 0 | 0,045263431 | 0 | 0,095767575 | 0,420930974 | 0,430310325 | 0 | 0 | 0,702272305 |

| Inspeção do Bloco do Motor | Força | Precisão | Velocidade | Consistência/Rigor | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
|---------------------------------|-------|-------------|------------|--------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| 0 Força | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 Precisão | 0 | 1 | 3 | 0,33333333 | 0 | 0 | 0 | 6,125 | 0 |
| 3 Velocidade | 0 | 0,33333333 | 1 | 0,2 | 0 | 0 | 0 | 6,111111111 | 0 |
| 7 Consistência/Rigor | 0 | 3 | 5 | 1 | 0 | 0 | 0 | 9,186666667 | 0 |
| 0 Repetitividade dos Movimentos | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 Habilidades Computacionais | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 Flexibilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 1 Adaptabilidade | 0 | 6 | 9 | 6 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 0 Destreza/Dificuldade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Total Colunas | 0 | 12,33333333 | 18 | 7,53333333 | 0 | 0 | 0 | 1,402777778 | 0 |
| | Robôs | | | | Humanos | | | | |

| MATRIZ AHP NORMALIZADA | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------|-------------|-------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| Inspeção do Bloco do Motor | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
| Força | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Precisão | 0 | 0,081081081 | 0,166666667 | 0,044247788 | 0 | 0 | 0 | 0,089108931 | 0 |
| Velocidade | 0 | 0,027027027 | 0,055555556 | 0,026548673 | 0 | 0 | 0 | 0,079207921 | 0 |
| Consistência | 0 | 0,243243243 | 0,277777778 | 0,132743363 | 0 | 0 | 0 | 0,118811881 | 0 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Habilidades Computacionais | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Flexibilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Adaptabilidade | 0 | 0,648648649 | 0,5 | 0,796460177 | 0 | 0 | 0 | 0,712871287 | 0 |
| Destreza | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| PESO DOS CRITÉRIOS [AHP] | | | | | | | | | |
|----------------------------|-------|-------------|-------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| Inspeção do Bloco do Motor | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
| Peso | 0 | 0,095276112 | 0,047084794 | 0,193144066 | 0 | 0 | 0 | 0,664495028 | 0 |
| Peso (%) | 0 | 9,527611156 | 4,708479399 | 19,31440663 | 0 | 0 | 0 | 66,44950282 | 0 |

| PESO DOS CRITÉRIOS APÓS PENALIZAÇÕES | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-------|-------------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-------------|
| Inspeção do Bloco do Motor | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
| Peso | 0 | 0,885993371 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,333333333 | 33,33333333 |
| Peso (%) | 0 | 88,59933709 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 33,33333333 | 3333,333333 |

| PESO DAS ALOCAÇÕES | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|--------|----------|-------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-------------|-------|-------------|
| Inspeção do Bloco do Motor | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza | TOTAL | |
| | Humano | 0 | 0,009527611 | 0,005885599 | 0,024143008 | 0 | 0 | 0 | 0,598045525 | 0 | 0,637601744 |
| | Robot | 0 | 0,0857485 | 0,041199195 | 0,169001058 | 0 | 0 | 0 | 0,066449503 | 0 | 0,362398256 |

Divisão de matrizes = 4,075

IC= 0,025

IC/IA = 0,028

| Teste de Consistência | |
|-------------------------------|-------|
| Matriz_Pesos | |
| Força | 0,000 |
| Precisão | 0,095 |
| Velocidade | 0,047 |
| Consistência | 0,193 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0,000 |
| Habilidades Comp | 0,000 |
| Flexibilidade | 0,000 |
| Adaptabilidade | 0,664 |
| Destreza | 0,000 |

x

0,000

0,384

0,191

0,825

0,000

0,000

0,000

3,009

0,000

Divisão de matrizes = 4,224

IC= 0,075

IC/IA = 0,083

Anexo F

Matrizes AHP: WS8e9

| Pick & Place: Árvore de cames | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
|-------------------------------|-------|-------------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-------------|
| 5 Força | 1 | 0,2 | 1 | 0 | 0,11111111 | 0 | 0 | 0 | 0,142857143 |
| 3 Precisão | 5 | 1 | 7 | 0 | 0,2 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 2 Velocidade | 1 | 0,142857143 | 1 | 0 | 0,11111111 | 0 | 0 | 0 | 0,142857143 |
| 0 Consistência | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Repetitividade dos Movimentos | 9 | 5 | 9 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 3 |
| Habilidades Computacionais | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 Flexibilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 Adaptabilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 3 Destreza/Dificuldade | 7 | 1 | 7 | 0 | 0,33333333 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Total Colunas | 23 | 7,342857143 | 25 | 0 | 1,75555556 | 0 | 0 | 0 | 5,285714286 |
| | | | | Robôs | | | | Humanos | |

Número de Critérios 5

| Teste de Consistência | |
|-------------------------------|-------|
| Matriz_Pesos | |
| Força | 0,040 |
| Precisão | 0,187 |
| Velocidade | 0,039 |
| Consistência | 0,000 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0,514 |
| Habilidades Comp | 0,000 |
| Flexibilidade | 0,000 |
| Adaptabilidade | 0,000 |
| Destreza | 0,220 |

x

= 0,205
0,982
0,194
0,000
2,820
0,000
0,000
0,000
1,131

| MATRIZ AHP NORMALIZADA | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------------|-------------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-------------|
| Pick & Place: Árvore de cames | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
| Força | 0,043478261 | 0,027237354 | 0,04 | 0 | 0,063291139 | 0 | 0 | 0 | 0,027027027 |
| Precisão | 0,217391304 | 0,13618677 | 0,28 | 0 | 0,113924051 | 0 | 0 | 0 | 0,189189189 |
| Velocidade | 0,043478261 | 0,019455253 | 0,04 | 0 | 0,063291139 | 0 | 0 | 0 | 0,027027027 |
| Consistência | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0,391304348 | 0,680933852 | 0,36 | 0 | 0,569620253 | 0 | 0 | 0 | 0,567567568 |
| Habilidades Computacionais | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Flexibilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Adaptabilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Destreza | 0,304347826 | 0,13618677 | 0,28 | 0 | 0,189873418 | 0 | 0 | 0 | 0,189189189 |

Divisão de matrizes = 5,197

IC= 0,049

IC/IA = 0,044

| PESO DOS CRITÉRIOS [AHP] | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-------------|
| Pick & Place: Árvore de cames | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
| Peso | 0,040206756 | 0,187338263 | 0,038650336 | 0 | 0,513885204 | 0 | 0 | 0 | 0,219919441 |
| Peso (%) | 4,020675624 | 18,73382629 | 3,865033601 | 0,435624335 | 51,38852041 | 0 | 0 | 0 | 21,99194407 |

| PESO DOS CRITÉRIOS APÓS PENALIZAÇÕES | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-------------|----------|-------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-------------|
| Pick & Place: Árvore de cames | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
| Peso | 0,040206756 | 0 | 0,219919441 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,2 | 20,08712487 |
| Peso (%) | 4,020675624 | 0 | 21,99194407 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 2008,712487 |

| PESO DAS ALOCAÇÕES | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-------------|------------|
| Pick & Place: Árvore de cames | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza | TOTAL |
| Humano | 0,005025845 | 0,018733826 | 0,004831292 | 0 | 0,05138852 | 0 | 0 | 0 | 0,197927497 | 0,27790698 |
| Robot | 0,035180912 | 0,168604437 | 0,033819044 | 0 | 0,462496684 | 0 | 0 | 0 | 0,021991944 | 0,72209302 |

| Instalação da Árvore de Cames | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
|-------------------------------|-------|----------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| 0 Força | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 Precisão | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,2 |
| 0 Velocidade | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 Consistência | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Habilidades Computacionais | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 Flexibilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 Adaptabilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 7 Destreza/Dificuldade | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Total Colunas | 0 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1,2 |
| | | | | Robôs | | | | | |

Número de Critérios 2

| Teste de Consistência | |
|-------------------------------|-------|
| Matriz_Pesos | |
| Força | 0,000 |
| Precisão | 0,167 |
| Velocidade | 0,000 |
| Consistência | 0,000 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0,000 |
| Habilidades Comp | 0,000 |
| Flexibilidade | 0,000 |
| Adaptabilidade | 0,000 |
| Destreza | 0,833 |

x

= 0,000
0,333
0,000
0,000
0,000
0,000
0,000
0,000
1,667

| MATRIZ AHP NORMALIZADA | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------|-------------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-------------|
| Instalação da Árvore de Cames | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
| Força | 0 | 0,166666667 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,166666667 |
| Precisão | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Velocidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Consistência | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Habilidades Computacionais | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Flexibilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Adaptabilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Destreza | 0 | 0,833333333 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,833333333 |

Divisão de matrizes = 2,000

IC= 0,000

IC/IA = 0,000

| PESO DOS CRITÉRIOS [AHP] | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------|-------------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-------------|
| Instalação da Árvore de Cames | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
| Peso | 0 | 0,166666667 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,833333333 |
| Peso (%) | 0 | 16,66666667 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 83,33333333 |

| PESO DOS CRITÉRIOS APÓS PENALIZAÇÕES | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-------|-------------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-------------|
| Instalação da Árvore de Cames | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
| Peso | 0 | 0,166666667 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,833333333 |
| Peso (%) | 0 | 16,66666667 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 83,33333333 |

| PESO DAS ALOCAÇÕES | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------|-------------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-------------|-------------|
| Instalação da Árvore de Cames | Força | Precisão | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza | TOTAL |
| Humano | 0 | 0,016666667 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,75 | 0,766666667 |
| Robot | 0 | 0,15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,083333333 | 0,233333333 |

| Instalação da correia | Força | Precisão | Velocidade | Consistência/Rigor na Execução | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
|----------------------------------|-------|----------|------------|--------------------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|-------------|
| 0 Força | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 Precisão | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 Velocidade | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 Consistência/Rigor na Execução | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Habilidades Computacionais | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 Flexibilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 1 Adaptabilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0,333333333 |
| 9 Destreza/Dificuldade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 1 |
| Total Colunas | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 1,333333333 |
| | | | | Robôs | | | | | |

Número de Critérios 2

| Teste de Consistência | |
|-------------------------------|-------|
| Matriz_Pesos | |
| Força | 0,000 |
| Precisão | 0,000 |
| Velocidade | 0,000 |
| Consistência | 0,000 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0,000 |
| Habilidades Comp | 0,000 |
| Flexibilidade | 0,000 |
| Adaptabilidade | 0,250 |
| Destreza | 0,750 |

x

= 0,000
0,000
0,000
0,000
0,000
0,000
0,000
0,500
1,500

| MATRIZ AHP NORMALIZADA | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------|---------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| Instalação da correia | Força | Preciso | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
| Força | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Precisão | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Velocidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Consistência | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Habilidades Computacionais | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Flexibilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Adaptabilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,25 | 0,25 |
| Destreza | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,75 | 0,75 |

Divisão de matrizes = 2,000

IC= 0,000

IC/IA = 0,000

| PESO DOS CRITÉRIOS [AHP] | | | | | | | | | |
|--------------------------|-------|---------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| Instalação da correia | Força | Preciso | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
| Peso | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,25 | 0,75 |
| Peso (%) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 25 | 75 |

| PESO DOS CRITÉRIOS APÓS PENALIZAÇÕES | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-------|---------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| Instalação da correia | Força | Preciso | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
| Peso | 0 | 0,1 | 0,3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,2 | 20 |
| Peso (%) | 0 | 10 | 30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 2000 |

| PESO DAS ALOCAÇÕES | | | | | | | | | | |
|-----------------------|-------|---------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|-------|
| Instalação da correia | Força | Preciso | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza | TOTAL |
| Humano | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,225 | 0,675 | 0,9 |
| Robot | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,025 | 0,075 | 0,1 |

| Aparafusar 8 parafusos da Arvore de Cames | Força | Preciso | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
|---|-------|---------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| 0 Força | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 Precisão | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 7 Velocidade | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 7 Consistência | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 7 Repetitividade dos Movimentos | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 7 Habilidades Computacionais | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 Flexibilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 Adaptabilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 0 Destreza/Dificuldade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Total Colunas | 0 | 4 | 4 | 4 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Número de Critérios 4

| Teste de Consistência | |
|-----------------------|-------|
| Matriz Pesos | |
| Força | 0,000 |
| Precisão | 0,250 |
| Velocidade | 0,250 |
| Consistência | 0,250 |
| Repetitividade dos | 0,250 |
| Habilidades Comp | 0,000 |
| Flexibilidade | 0,000 |
| Adaptabilidade | 0,000 |
| Destreza | 0,000 |

x

0,000

1,000

1,000

= 1,000

1,000

0,000

0,000

0,000

0,000

| MATRIZ AHP NORMALIZADA | | | | | | | | | |
|---|-------|---------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| Aparafusar 8 parafusos da Arvore de Cames | Força | Preciso | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
| Força | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Precisão | 0 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Velocidade | 0 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Consistência | 0 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Repetitividade dos Movimentos | 0 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Habilidades Computacionais | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Flexibilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Adaptabilidade | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Destreza | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Divisão de matrizes = 4,000

IC= 0,000

IC/IA = 0,000

| PESO DOS CRITÉRIOS [AHP] | | | | | | | | | |
|---|-------|---------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|
| Aparafusar 8 parafusos da Arvore de Cames | Força | Preciso | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza |
| Peso | 0 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Peso (%) | 0 | 25 | 25 | 25 | 25 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| PESO DAS ALOCAÇÕES | | | | | | | | | | |
|---|-------|---------|------------|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|----------------|----------|--------|
| Aparafusar 8 parafusos da Arvore de Cames | Força | Preciso | Velocidade | Consistência | Repetitividade dos Movimentos | Habilidades Computacionais | Flexibilidade | Adaptabilidade | Destreza | TOTAL |
| Humano | 0 | 0,025 | 0,03125 | 0,03125 | 0,025 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,1125 |
| Robot | 0 | 0,225 | 0,21875 | 0,21875 | 0,225 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,8875 |

Anexo G

Fatores de Penalização

| Categorias de Movimentos | | | | | | | | | | | | | Multi-Tasking | Fadiga | Consistência | Subjetividade | |
|--------------------------|----------------|--|-----------|----------------|----------|----------------------------|-------------------|--------------------|----------------------|----------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------|----------------|--------------|----------------|--------|
| Alcançar | | | Mover | | Agarrar | | | | Posicionar | | | | | | | | |
| Variabilidade da Posição | | Complexidade <small>(Procura e Seleção)</small> | Distância | Dimensões/Peso | Precisão | Complexidade | | Dimensões | | Complexidade | | Complexidade | | | | | |
| | | | | | | (Quantidade de Movimentos) | Grandes Dimensões | Pequenas Dimensões | Estrutura Deformável | (Posicionamento do objeto) | (Precisão) | (Necessidade de Ajustes) | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Humano | 2 | 4 | 2 | 10 | 4 | 4 | 3 | 4 | 20 | 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 4 | 6 | 6 |
| Robot | Adaptabilidade | Destreza | Peso | Peso | Precisão | Destreza | Peso | Precisão | Destreza | Destreza | (H)Precisoa/(R)Destreza | Adaptabilidade | Velocidade | Repetitividade | Consistência | Adaptabilidade | |
| os da linha | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,2630 | 0,1130 | 0,0000 | 0,0000 | |
| | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,7861 | 0,9391 | 0,0000 | 0,0000 | |
| | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| os da linha | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0223 | 0,3403 | 0,0000 | 0,0000 | |
| | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0669 | 1,0210 | 0,0000 | 0,0000 | |
| | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0791 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0791 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,2102 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,1102 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | |
| ão no bloco | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0540 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,6484 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,2934 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 3,5085 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 7,0170 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| o de | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,3030 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 1,4545 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| e | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,3818 | 0,0000 |
| | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,6873 | 0,0000 |
| | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| r | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 1,2461 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,4988 | 0,0000 | 0,0000 |
| | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 6,2347 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| os do tipo A | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,3136 | 0,0000 | 0,0000 |
| | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,3685 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,6297 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 1,7613 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| os do tipo B | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,2222 | 0,0000 | 0,0000 |
| | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,4000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| os do tipo C | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,2857 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,5143 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |

Referências

- [1] Christian Becker e Armin Scholl. A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European journal of operational research*, 168(3):694–715, 2006.
- [2] G Michalos, S Makris, N Papakostas, D Mourtzis, e G Chrysosolouris. Automotive assembly technologies review: challenges and outlook for a flexible and adaptive approach. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2(2):81–91, 2010.
- [3] Hiroshi Makino e Tamio Arai. New developments in assembly systems. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 43(2):501–512, 1994.
- [4] Jörgen Frohm, Veronica Lindström, e Monica Bellgran. A model for parallel levels of automation within manufacturing. Em *18th International Conference on Production Research*, 2005.
- [5] Jörgen Frohm, Veronica Lindström, Mats Winroth, e Johan Stahre. Levels of automation in manufacturing. *Ergonomia*, 2008.
- [6] Kristina Säfsten, Mats Winroth, e Johan Stahre. The content and process of automation strategies. *International Journal of Production Economics*, 110(1):25–38, 2007.
- [7] Luc Laperrrière, Gunther Reinhart, et al. *CIRP encyclopedia of production engineering*. Springer Publishing Company, Incorporated, 2014.
- [8] Rolf Dieter Schraft, Christian Meyer, Christopher Parltitz, e Evert Helms. Powermate—a safe and intuitive robot assistant for handling and assembly tasks. Em *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on*, páginas 4074–4079. IEEE, 2005.
- [9] Christian Küber, Engelbert Westkämper, Bernd Keller, e Hans-Friedrich Jacobi. Method for configuring product and order flexible assembly lines in the automotive industry. *Procedia CIRP*, 54:215–220, 2016.
- [10] Jörg Krüger, Terje K Lien, e Alexander Verl. Cooperation of human and machines in assembly lines. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 58(2):628–646, 2009.
- [11] Hk ElMaraghy e W ElMaraghy. Smart adaptable assembly systems. *Procedia CIRP*, 44:4–13, 2016.

- [12] ZX Guo, Wai Keung Wong, SYS Leung, e JT Fan. Intelligent production control decision support system for flexible assembly lines. *Expert Systems with Applications*, 36(3):4268–4277, 2009.
- [13] Olivier Cardin, Damien Trentesaux, André Thomas, Pierre Castagna, Thierry Berger, e Hind Bril El-Haouzi. Coupling predictive scheduling and reactive control in manufacturing hybrid control architectures: state of the art and future challenges. *Journal of Intelligent Manufacturing*, páginas 1–15, 2015.
- [14] Rossitza M Setchi e Nikolaos Lagos. Reconfigurability and reconfigurable manufacturing systems: state-of-the-art review. Em *Industrial Informatics, 2004. INDIN'04. 2004 2nd IEEE International Conference on*, páginas 529–535. IEEE, 2004.
- [15] Zhuming M Bi, Sherman YT Lang, Weiming Shen, e Lihui Wang. Reconfigurable manufacturing systems: the state of the art. *International Journal of Production Research*, 46(4):967–992, 2008.
- [16] Mostafa G Mehrabi, A Galip Ulsoy, e Yoram Koren. Reconfigurable manufacturing systems: Key to future manufacturing. *Journal of intelligent manufacturing*, 11(4):403–419, 2000.
- [17] Yoram Koren, Uwe Heisel, Francesco Jovane, Toshimichi Moriwaki, Gumter Pritschow, Galip Ulsoy, e Hendrik Van Brussel. Reconfigurable manufacturing systems. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 48(2):527–540, 1999.
- [18] Mostafa G Mehrabi, A Galip Ulsoy, Yoram Koren, e Peter Heytler. Trends and perspectives in flexible and reconfigurable manufacturing systems. *Journal of Intelligent manufacturing*, 13(2):135–146, 2002.
- [19] Colleen Mellor. Quick change artists. *PEM*, 26(1):29–29, 2002.
- [20] Jörg Krüger, Volker Katschinski, Dragoljub Surdilovic, e Gerhard Schreck. Flexible assembly systems through workplace-sharing and time-sharing human-machine cooperation (pisa). Em *Robotics (ISR), 2010 41st International Symposium on and 2010 6th German Conference on Robotics (ROBOTIK)*, páginas 1–5. VDE, 2010.
- [21] ZM Bi, Lihui Wang, e Sherman YT Lang. Current status of reconfigurable assembly systems. *International Journal of Manufacturing Research*, 2(3):303–328, 2007.
- [22] Narges Asadi, Anders Fundin, e Mats Jackson. The essential constituents of flexible assembly systems: a case study in the heavy vehicle manufacturing industry. *Global Journal of Flexible Systems Management*, 16(3):235–250, 2015.
- [23] Nils Boysen, Malte Fliedner, e Armin Scholl. Assembly line balancing: Which model to use when? *International Journal of Production Economics*, 111(2):509–528, 2008.
- [24] Juhani Heilala e Paavo Voho. Modular reconfigurable flexible final assembly systems. *Assembly Automation*, 21(1):20–30, 2001.
- [25] Jörg Krüger, Bertram Nickolay, P Heyer, e Günther Seliger. Image based 3d surveillance for flexible man-robot-cooperation. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 54(1):19–22, 2005.

- [26] Vijay Manikrao Athawale e Shankar Chakraborty. A comparative study on the ranking performance of some multi-criteria decision-making methods for industrial robot selection. *International journal of industrial engineering computations*, 2(4):831–850, 2011.
- [27] Thomas L Saaty. Decision making with the analytic hierarchy process. *International journal of services sciences*, 1(1):83–98, 2008.
- [28] R Manzini*, M Gamberi, A Regattieri, e A Persona. Framework for designing a flexible cellular assembly system. *International journal of production research*, 42(17):3505–3528, 2004.
- [29] Ahmet S Yigit e Ali Allahverdi. Optimal selection of module instances for modular products in reconfigurable manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 41(17):4063–4074, 2003.
- [30] Hoda A ElMaraghy. Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms. *International journal of flexible manufacturing systems*, 17(4):261–276, 2005.
- [31] Roger Beach, Alan P Muhlemann, DHR Price, Andrew Paterson, e John A Sharp. A review of manufacturing flexibility. *European Journal of Operational Research*, 122(1):41–57, 2000.
- [32] Andrea Krasa Sethi e Suresh Pal Sethi. Flexibility in manufacturing: a survey. *International journal of flexible manufacturing systems*, 2(4):289–328, 1990.
- [33] Giulio Rosati, Maurizio Faccio, Andrea Carli, e Aldo Rossi. Fully flexible assembly systems (f-fas): a new concept in flexible automation. *Assembly Automation*, 33(1):8–21, 2013.
- [34] TK Lien e FO Rasch. Hybrid automatic-manual assembly systems. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 50(1):21–24, 2001.
- [35] Niels Lohse, Hitendra Hirani, e Svetan Ratchev. Equipment ontology for modular reconfigurable assembly systems. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 17(4):301–314, 2005.
- [36] Kerstin Dencker, Åsa Fasth, Johan Stahre, Lena Mårtensson, Thomas Lundholm, e Hakan Akillioglu. Proactive assembly systems-realising the potential of human collaboration with automation. *Annual reviews in control*, 33(2):230–237, 2009.
- [37] T Arai, Yusuke Maeda, H Kikuchi, e M Sugi. Automated calibration of robot coordinates for reconfigurable assembly systems. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 51(1):5–8, 2002.
- [38] Raja Parasuraman, Thomas B Sheridan, e Christopher D Wickens. A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 30(3):286–297, 2000.
- [39] Raja Parasuraman e Christopher D Wickens. Humans: Still vital after all these years of automation. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 50(3):511–520, 2008.

- [40] David B Kaber e Mica R Endsley. The effects of level of automation and adaptive automation on human performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 5(2):113–153, 2004.
- [41] Mikell P Groover. *Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing*. Prentice Hall Press, 2007.
- [42] Harold E Price. The allocation of functions in systems. *Human factors*, 27(1):33–45, 1985.
- [43] Toshiyuki Inagaki. Adaptive automation: Sharing and trading of control. *Handbook of cognitive task design*, 8:147–169, 2003.
- [44] Zhi-Gang Wei, Anil P Macwan, e Peter A Wieringa. A quantitative measure for degree of automation and its relation to system performance and mental load. *Human Factors*, 40(2):277–295, 1998.
- [45] Joost CF de Winter e Dimitra Dodou. Why the fitts list has persisted throughout the history of function allocation. *Cognition, Technology & Work*, 16(1):1–11, 2014.
- [46] Paul M Fitts. The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of experimental psychology*, 47(6):381, 1954.
- [47] Nehemiah Jordan. Allocation of functions between man and machines in automated systems. *Journal of applied psychology*, 47(3):161, 1963.
- [48] Marie-Pierre Pacaux-Lemoine, Damien Trentesaux, Gabriel Zambrano Rey, e Patrick Millot. Designing intelligent manufacturing systems through human-machine cooperation principles: A human-centered approach. *Computers & Industrial Engineering*, 2017.
- [49] Rolf Bernhardt, Dragoljub Surdilovic, Volker Katschinski, e Klaus Schröer. Flexible assembly systems through workplace-sharing and time-sharing human-machine cooperation–pisa. *IFAC Proceedings Volumes*, 40(3):247–251, 2007.
- [50] George Michalos, Sotiris Makris, Jason Spiliotopoulos, Ioannis Misios, Panagiota Tsarouchi, e George Chryssolouris. Robo-partner: Seamless human-robot cooperation for intelligent, flexible and safe operations in the assembly factories of the future. *Procedia CIRP*, 23:71–76, 2014.
- [51] George Michalos, Konstantinos Kaltsoukalas, Panagiotis Aivaliotis, Platon Sipsas, Andreas Sardelis, e George Chryssolouris. Design and simulation of assembly systems with mobile robots. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 63(1):181–184, 2014.
- [52] S Makris, G Michalos, A Eytan, e G Chryssolouris. Cooperating robots for reconfigurable assembly operations: Review and challenges. *Procedia CIRP*, 3:346–351, 2012.
- [53] J Edward Colgate, J Edward, Michael A Peshkin, e Witaya Wannasuphoprasit. Co-bots: Robots for collaboration with human operators. 1996.

- [54] Mansour Rahimi e Waldemar Karwowski. *Human-robot interaction*. Taylor & Francis, Inc., 1992.
- [55] Pierre De Lit, Joëlle Danloy, Alain Delchambre, e J-M Henrioud. An assembly-oriented product family representation for integrated design. *IEEE transactions on robotics and automation*, 19(1):75–88, 2003.
- [56] Saurabh Gupta e Viswanathan Krishnan. Product family-based assembly sequence design methodology. *IIE transactions*, 30(10):933–945, 1998.
- [57] S Jack Hu, J Ko, L Weyand, HA ElMaraghy, TK Lien, Y Koren, Hl Bley, G Chrysosouris, N Nasr, e M Shpitalni. Assembly system design and operations for product variety. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 60(2):715–733, 2011.
- [58] B Scholz-Reiter e M Freitag. Autonomous processes in assembly systems. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 56(2):712–729, 2007.
- [59] HE Price e R Pulliam. The allocation of functions in man-machine systems. 1982.
- [60] Ashkan Negahban e Jeffrey S Smith. Simulation for manufacturing system design and operation: Literature review and analysis. *Journal of Manufacturing Systems*, 33(2):241–261, 2014.
- [61] Richard P Paul e Shimon Y Nof. Work methods measurement—a comparison between robot and human task performance. *International Journal of Production Research*, 17(3):277–303, 1979.

